



**ŘÍZENÍ PLOŠINY SE ŠESTI STUPNI VOLNOSTI  
S OHLEDEM NA BEZPEČNOST  
ZKOUŠENÉHO OBJEKTU**

**SIX DEGREES OF FREEDOM PLATFORM CONTROL  
IN RELATION TO SAFETY OF PART UNDER TEST**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

Autor

**Ing. Aleš Lufinka**

Studijní program

P 2612

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor

2612V045

Technická kybernetika

Pracoviště

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Technická univerzita v Liberci

Studentská 2

461 17 Liberec

Vedoucí disertační práce

Doc. Ing. Pavel Rydlo, Ph.D.

## **Anotace**

Plošina se šesti stupni volnosti je zařízení pro testování vlastností mechanických celků při obecném prostorovém buzení. Protože se předpokládá využití plošiny pro testování dílů v interakci s člověkem (např. automobilové sedadlo a řidič), musí celé zařízení splňovat parametry normy ČSN EN ISO 13090-1 „Vibrace a rázy – Pokyny pro bezpečnostní hlediska zkoušek a pokusů na lidech“. V ní jsou definovány maximální přípustné hodnoty zátěže pokusné osoby a neméně závažnost je kladena na technické prostředky řízení experimentu, aby v žádné situaci nemohlo dojít k překročení limitních hodnot. Proto musí být experimentální zařízení vybaveno kromě hlavního řídicího systému, který v normálním provozu ovládá celé zařízení, ještě záložním havarijním systémem. Ten monitoruje celý proces a v případě jakékoliv poruchy dokáže zastavit pohyb experimentálního zařízení nezávisle na stavu ostatních obvodů. Havarijní zastavení navíc musí být plynulé, aby při něm nedošlo ke skokovým změnám rychlosti a tím vzniku nepřipustných špiček zrychlení.

Náplní práce je realizace hardwaru a softwaru hlavního i havarijního řídicího systému plošiny a optimalizace jejich statických a dynamických parametrů tak, aby byly splněny požadavky výše uvedené normy.

## **Klíčová slova**

testy mechanických dílů v interakci s člověkem, 3-osové buzení, řídicí systém, PID regulace, bezpečnostní systém

## **Annotation**

The six degrees of freedom platform is a device for testing of machine elements and systems properties by 3-axial excitation. Because we expect to use this device for human – mechanic parts interaction testing (for example a car seat with a driver), the device have to suit safety requirements of the ČSN EN ISO 13090 standard “Mechanical vibration and shock – Guidance on safety aspects of tests and experiments with people”. This standard defines maximal excitation values for human tests and dictates experiment control technical facilities for fear of limit values break. It means, the experimental device have to contain main control system and safety system. The main system is used for regular control and safety system supervises activity of device and can shut down platform independently from the main control in case of any error. The emergency stop procedure has to handle the platform smoothly with no acceleration peaks.

The thesis covers hardware and software design of control and safety systems for six degrees of freedom platform and static and dynamic optimalization their parameters to fulfillment of the safety requirements of the EN ISO 13090 standard.

## **Keywords**

human – mechanic parts interaction testing, 3-axis excitation, control system, PID control, safety system

## **Poděkování**

Dovolte mi na úvod poděkovat všem, kteří mi umožnili dokončit tuto práci. Je to v první řadě můj školitel Doc. Ing. Pavel Rydlo, Ph.D., který byl vždy ochotný poradit a pomoci a neméně ochotně řešil všechny administrativní úkony spojené s mým studiem. Dále je to vedoucí naší katedry Doc. Ing. Ladislav Ševčík, CSc., který mi v rámci mých povinností na katedře vytvořil prostor potřebný k mé práci. Poděkování pochopitelně patří i celému týmu spolupracovníků, který se na tvorbě tak složitého zařízení podílel, zejména pak panu Doc. Ing. Jaromíru Barborovi, CSc. a panu Doc. Ing. Josefu Mevaldovi, CSc., kteří vytvářeli mechanicko-hydraulickou část.

Za dlouhodobou podporu patří v neposlední řadě velký dík i celé mojí rodině.

## OBSAH

1.	ÚVOD	7
2.	STANOVENÍ KONCEPCE OVLÁDACÍHO SYSTÉMU PLOŠINY	9
2.1.	POPIS PLOŠINY SE ŠESTI STUPNI VOLNOSTI	9
2.2.	TECHNICKÉ PROSTŘEDKY PLOŠINY	11
2.2.1.	Hydromotor	11
2.2.2.	Servoventil	12
2.2.3.	Napajec	14
2.2.4.	Pomocné hydraulické obvody	15
2.2.5.	Celkové schéma hydraulických obvodů plošiny	16
2.2.6.	Shrnutí funkcí ovládacího systému potřebných pro ovládání plošiny	17
2.3.	NORMA ČSN EN ISO 13090-1	17
2.3.1.	Požadavky na uspořádání experimentálního pracoviště	17
2.3.2.	Maximálně přípustné expozice testované osoby vibracemi a rázy	17
2.3.3.	Technické prostředky zabezpečení experimentálního zařízení	20
2.4.	KONCEPCE OVLÁDACÍHO SYSTÉMU	22
2.4.1.	Úvodní úvahy	22
2.4.2.	Popis řídicího systému Inova	22
2.4.3.	Zvolená koncepce ovládacího systému	24
3.	ŘÍDÍCÍ SYSTÉM	25
3.1.	HARDWARE ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU	25
3.1.1.	Počítačové jádro	25
3.1.2.	Měření polohy pístnic	27
3.1.3.	Řízení servoventilů	31
3.1.4.	Výkonové obvody	36
3.1.5.	Zapojení řídicího systému - závěrečné shrnutí	39
3.2.	SOFTWARE VYBAVENÍ	42
3.2.1.	Labview a real-time	42
3.2.2.	Komunikace Labview se vstupně výstupními kartami	45
3.2.3.	Definice úloh v prostředí Measurement and Automation Explorer	46
3.2.4.	Struktura programu řídicího systému	49
3.2.5.	Aplikace pl_reg	50
3.2.6.	Podprogram pl_read	55
3.2.7.	Aplikace pl_user	57
3.2.8.	Podprogram pl_file	64
3.2.9.	Podprogram pl_rampa	65
3.2.10.	Aplikace pl_display	66
3.2.11.	Aplikace pr_generator	67
3.2.12.	Aplikace pr_monitor	69
3.2.13.	Závěrečné shrnutí softwarového vybavení	70
3.3.	OPTIMALIZACE VLASTNOSTÍ ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU	71
3.3.1.	Teorie hydraulického servomechanismu	71

3.3.2.	Problematika matematického modelování hydraulických obvodů	76
3.3.3.	Vytvořený model hydraulického servomechanismu	78
3.3.4.	Optimalizace reálných parametrů PID regulace	82
3.3.5.	Měření frekvenčních charakteristik plošiny	85
3.3.6.	Ověření funkčnosti zařízení při vykonávání reálné trajektorie	90
3.4.	ŘÍDÍCÍ SYSTÉM - SHRNUTÍ	92
4.	BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉM	93
4.1.	STANOVENÍ KONCEPCE BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU	93
4.1.1.	Princip činnosti bezpečnostního systému	93
4.1.2.	Shrnutí požadovaných funkcí bezpečnostního systému	95
4.1.3.	Princip měření při ověřování funkcí bezpečnostního systému	95
4.2.	HYDRAULICKÝ ODPOJOVAČ	96
4.2.1.	Úvodní úvahy	96
4.2.2.	Napajec jako bezpečnostní odpojovač	96
4.2.3.	Servoventil jako hydraulický odpojovač	98
4.2.4.	Odpojovač Rexroth Z4WE 6	100
4.3.	KOMPONENTY BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU	105
4.3.1.	Tlačítka	105
4.3.2.	Monitor překročení vymezeného zdvihu	106
4.3.3.	Monitor zrychlení	108
4.3.4.	Informační systém	113
4.3.5.	Pomocné spínače	116
4.4.	CELKOVÉ ZAPOJENÍ BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU	116
4.4.1.	Bezpečnostní systém – výkonová část	116
4.4.2.	Bezpečnostní systém - logika	118
4.4.3.	Bezpečnostní systém – spínače ventilů	120
4.5.	OVĚŘENÍ ČINNOSTI BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU	122
5.	ZÁVĚR	123
6.	PROTOKOL O SCHVÁLENÍ ZAŘÍZENÍ DO PROVOZU	125
7.	LITERATURA	126
7.1.	POUŽITÁ LITERATURA	126
7.2.	MOJE PUBLIKACE	128

## 1. ÚVOD

Hydrodynamická laboratoř vznikla při Katedře částí a mechanismů strojů v roce 1997 za podpory MŠMT v rámci grantů IN 96014 a VS 97085. Zařízení laboratoře se využívá pro výzkum a testování zařízení a strojních součástí v různých oblastech a oborech. Podstatnou část výzkumu již od počátku tvoří problematika vibroizolací strojních zařízení, zejména pak automobilových sedaček. V rámci tohoto výzkumu bylo však možno testovat sedačky jen při jednoosém zatížení, protože laboratoř disponovala jen jednoduchými lineárními hydromotory. Příklad takového zatěžování sedačky je na obrázku č.1.



**Obr. 1 Příklad jednoosého zatěžování automobilového sedadla**

Toto jednoosé zatěžování lze ještě akceptovat pro pasivní sedačky, kde se jedná převážně o vlastnosti výplňových pěn a potahových materiálů. U aktivně odpružených sedaček (v nákladních automobilech, autobusech, zemních strojích,...) se projevují odlišné vlastnosti mechanismu sedačky při pouze jednoosém (svislém) buzení a reálným provozem, kdy dochází i k bočním namáháním mechanismu sedačky. Mechanismus nikdy není ideální, je plný pasivních odporů a hlavně různých vůlí. V důsledku působení bočních sil se často podstatně mění tuhostní vlastnosti mechanismu. To se projevuje častým selháním regulace sedačky, která byla naladěna jen při jednoosém buzení, v reálném provozu. Z tohoto důvodu byla ze strany průmyslových podniků, které se vývojem sedaček zabývají, požadována možnost simulace reálných provozních podmínek – prostorového buzení sedačky v laboratoři. V rámci výzkumného záměru MSM 4674788501 Optimalizace vlastností strojů v interakci s pracovními procesy a člověkem bylo proto rozhodnuto vybudovat v hydrodynamické laboratoři unikátní zařízení pro prostorové buzení – plošinu se šesti stupni volnosti. Ta umožňuje vykonávat s testovaným dílem (sedačkou) obecný prostorový pohyb a simulovat tak reálný provoz (např. jízdu terénem). Konstrukce se ujal tým odborníků z Katedry částí a mechanismů strojů a Katedry mechaniky, pružnosti a pevnosti strojní fakulty. Během konstrukce mechanické části plošiny byl vznesen ještě další požadavek na možnost testování sedaček nejen s umělou zátěží, ale přímo s živým člověkem. Tím by se laboratorní podmínky dále přiblížily reálným, protože náhradní umělá zátěž na sedačce neodpovídá ve všech parametrech vlastnostem lidského těla. Tento požadavek však přinesl úplně nové požadavky na ovládací systém celého zařízení, který pro zkoušky s člověkem musí splňovat bezpečnostní

kritéria daná normou ČSN EN ISO 13090-1 „Vibrace a rázy – Pokyny pro bezpečnostní hlediska zkoušek a pokusů na lidech“ [1].

Mým úkolem v týmu, který realizoval stavbu plošiny se šesti stupni volnosti, byl komplexní návrh a praktická realizace všech hardwarových i softwarových prostředků, sloužících k řízení celého zařízení, tedy vytvoření a zprovoznění ovládacího systému, který umožní řídit pohyby plošiny s požadovanou přesností a dynamickými vlastnostmi při splnění všech bezpečnostních požadavků kladených normou ČSN EN ISO 13090-1 na zkušební zařízení pro testy mechanických dílů v interakci s lidmi.

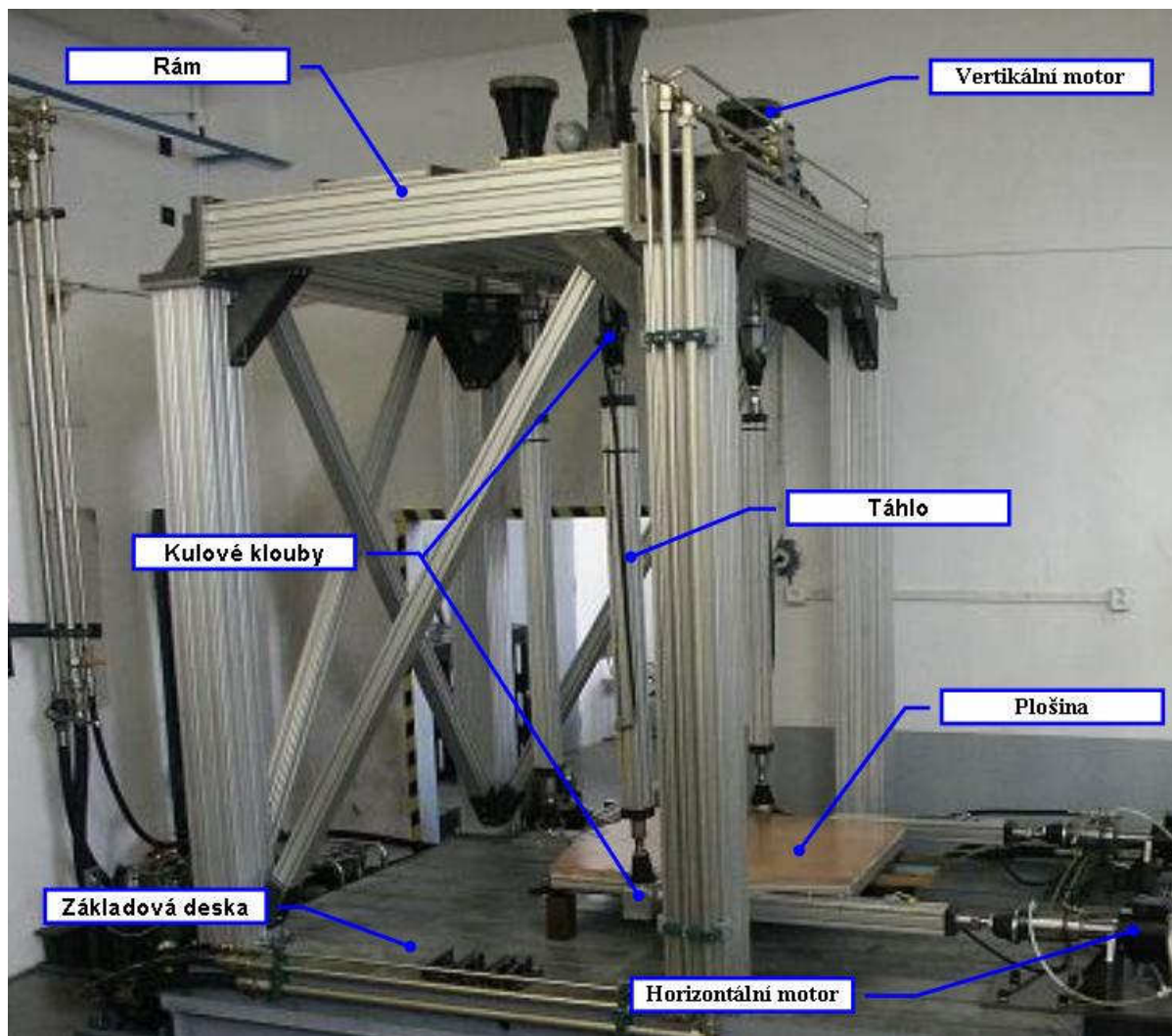
V mé disertační práci je popsán kompletní postup návrhu, praktické realizace a optimalizace ovládacího systému plošiny se šesti stupni volnosti. Práce je členěna do tří hlavních kapitol. Po tomto úvodu, kde jsem stručně nastínil důvody vedoucí k realizaci zařízení, následuje kapitola popisující mechanicko-hydraulickou část zařízení, která vlastně byla daným výchozím stavem pro moje řešení. V kapitole jsou dále shrnuty i hlavní požadavky výše zmíněné normy. Ze všech těchto atributů pak vyplývá koncepce návrhu ovládacího systému. Další dvě kapitoly jsou nejobsáhlejší. Obsahují totiž jádro mé práce – vlastní návrh hardwarových a softwarových prostředků řídicího i bezpečnostního systému, včetně popisu metod testování funkčnosti a ladění statických i dynamických vlastností celého systému. Práce obsahuje i mnoho výsledků praktických měření, kterými se v průběhu stavby i po jejím dokončení ověřovala činnost jednotlivých komponentů. Převážná většina těchto měření byla zpracována v aplikaci DATEL, což je softwarový balík pro úpravu a prezentaci naměřených dat, který jsem vytvořil pro potřeby laboratoře i komerční využití v minulých letech. Z této aplikace pochází i grafické výstupy měření publikované v této práci.



## 2. STANOVENÍ KONCEPCE OVLÁDACÍHO SYSTÉMU PLOŠINY

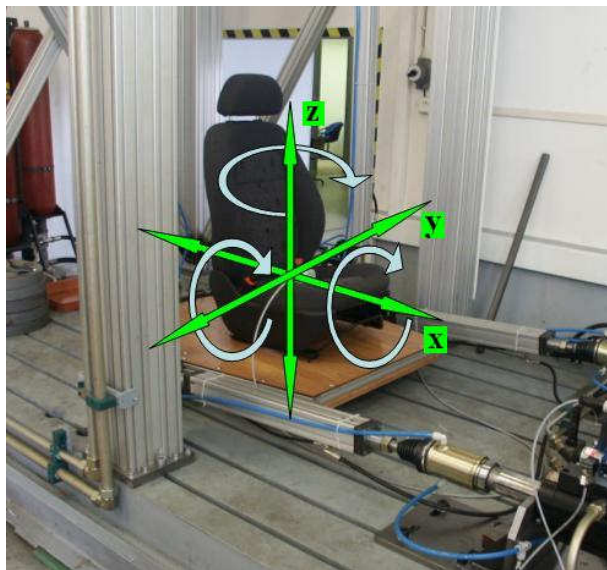
### 2.1. POPIS PLOŠINY SE ŠESTI STUPNI VOLNOSTI

Plošina se šesti stupni volnosti je mechanické zařízení, které umožňuje s testovaným objektem vykonávat obecný prostorový pohyb. Celkový pohled na plošinu je na obrázku č.2.



Obr. 2 Celkový pohled na plošinu

Základovou desku tvoří litinové drážkové desky zalité v betonovém bloku. Celý tento blok je od podlahy místnosti oddělen pryžovou deskou. Z hlediska vlastních frekvencí zařízení to není příliš ideální řešení (může dojít ke kmitání celého bloku vlivem provozních frekvencí plošiny), ale vzhledem ke „kvalitě“ budovy bylo při konstrukci nutno zajistit utlumení vibrací přenášejících se ze zařízení do budovy. Na deskách jsou ukotveny tři horizontální lineární hydromotory a pevný rám z hliníkových profilů ITEM, který na svém vrcholu nese další tři vertikální motory. Plošina je tedy vybavena celkem šesti shodnými motory. Umístění motorů je vidět na obrázku č.2, pouze třetí horizontální motor je „schován“ vzadu za plošinou a je kolmo k prvním dvěma. Na pístnici každého hydromotru je připevněno přes kulový kloub táhlo. Na druhý konec táhla je opět přes kulový kloub upevněna plošina, na kterou se pak kotví testovaný objekt. Plošina je tedy v prostoru držena jen táhly od hydromotorů a vzájemným pohybem pístnic jednotlivých motorů lze s plošinou vykonávat obecný prostorový pohyb. Schéma možných pohybů je naznačeno na obrázku číslo 3.



Obr. 3 Možné pohyby plošiny

Z obrázku je patrné, že s plošinou lze pohybovat lineárně ve třech osách a dále ji naklápět (rotovat) okolo těchto os. Tři posuvy a tři rotace, tedy celkem šest možných pohybů, dalo zařízení jeho název – Plošina se šesti stupni volnosti. Nosnost plošiny byla navržena právě s ohledem na typ nejčastěji testovaného objektu, tedy sedačky s řidičem. Je to 250kg (50kg váží vlastní plošina, 100kg je počítáno na sedačku s kotvícím a zádržným rámem a dalších 100kg na člověka). Nosnost není omezena motory, ty unesou mnohem více, ale je limitována mechanickou konstrukcí, hlavně kulovými klouby. Musí se totiž počítat i s dynamickými účinky naložené hmoty, protože maximální dosažitelná rychlost pístů je poměrně velká – při plném provozním tlaku přesahuje 1m/s. Taková rychlost se pochopitelně nepoužívá v testech s člověkem, protože zrychlení potřebné k jejímu dosažení a pak i následnému ubrždění na omezené dráze zdvihu pístnice by přesáhlo hodnoty povolené normou. Maximální velikost posuvů je dána zdvihem hydraulických motorů a ten je  $\pm 100\text{mm}$  od střední polohy. Velikost rotací samozřejmě vychází opět ze zdvihů motorů – maximální hodnoty se dosáhne úplným vysunutím pístnice jednoho a úplným zasunutím pístnice druhého z motorů, které určují rotaci okolo dané osy. Při tomto stavu však jsou již kulové klouby na hranici svého rozsahu a proto byl provozní zdvih motorů stanoven jen na  $\pm 70\text{mm}$ . Zbylých 30mm na každé straně se v běžném provozu nepoužívá a slouží jako bezpečnostní rezerva ve zdvihu pro dobrždění při případných havarijních stavech. Na obrázku č. 4 je ukázka několika poloh plošiny při dosažení provozních krajních poloh (tedy zdvihů 70mm).



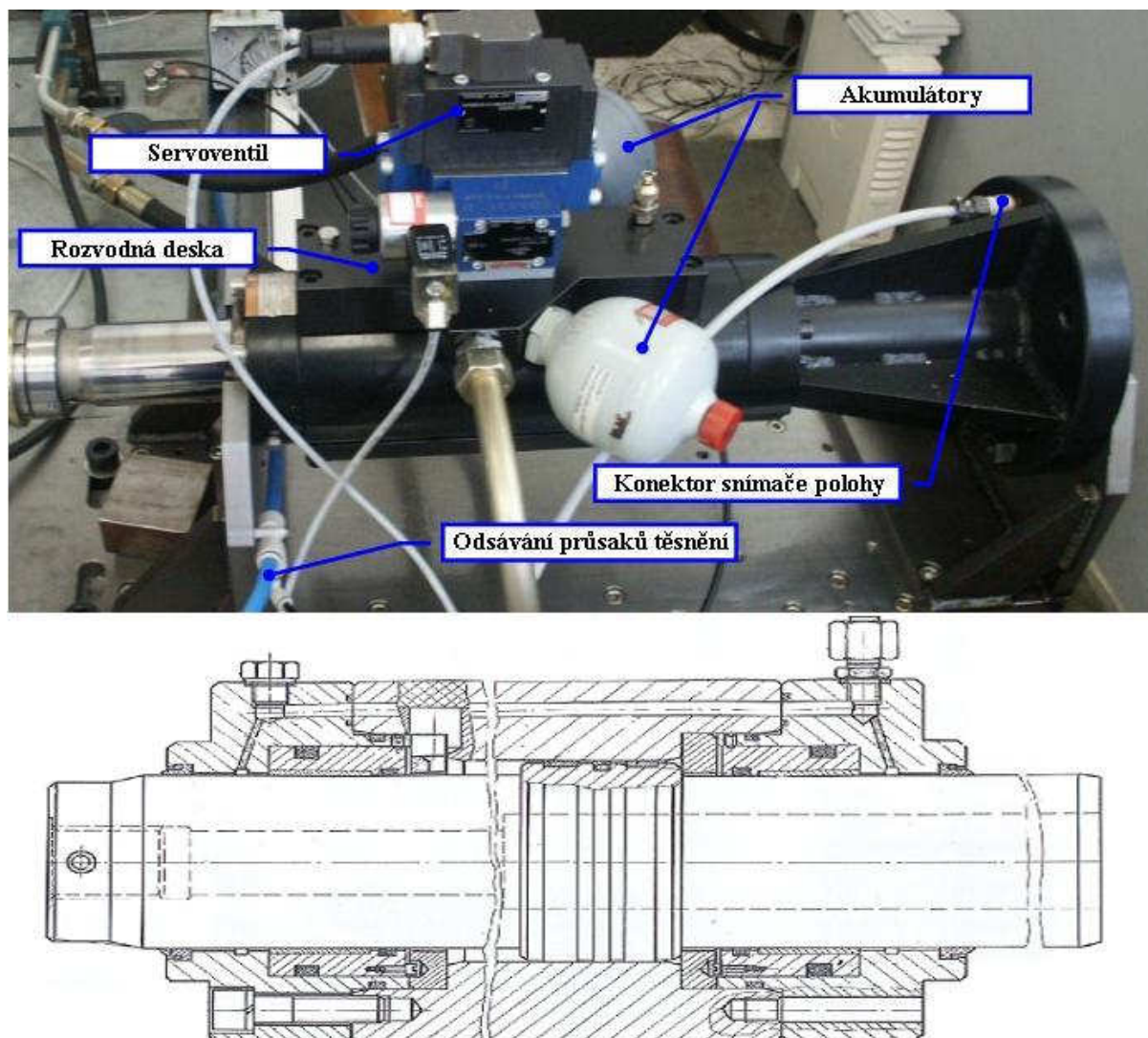
Obr. 4 Ukázka krajních poloh plošiny



## 2.2. TECHNICKÉ PROSTŘEDKY PLOŠINY

### 2.2.1. Hydromotor

Plošina je osazena šesti shodnými lineárními hydraulickými motory SAVAD 20-200 M019 firmy Inova Praha. Motory pochází z osmdesátých let minulého století a byly získány darem po mnohaletém provozu. Před použitím na plošině na nich byla provedena celková repase, spočívající v nové povrchové úpravě pístnice a výměně všech stěrácích a těsnicích elementů. Celkový pohled na kompletně osazený hydromotor a náčrt jeho vnitřního provedení je na obrázku č. 5 (náčrt je převzat z dokumentace výrobce [2]).



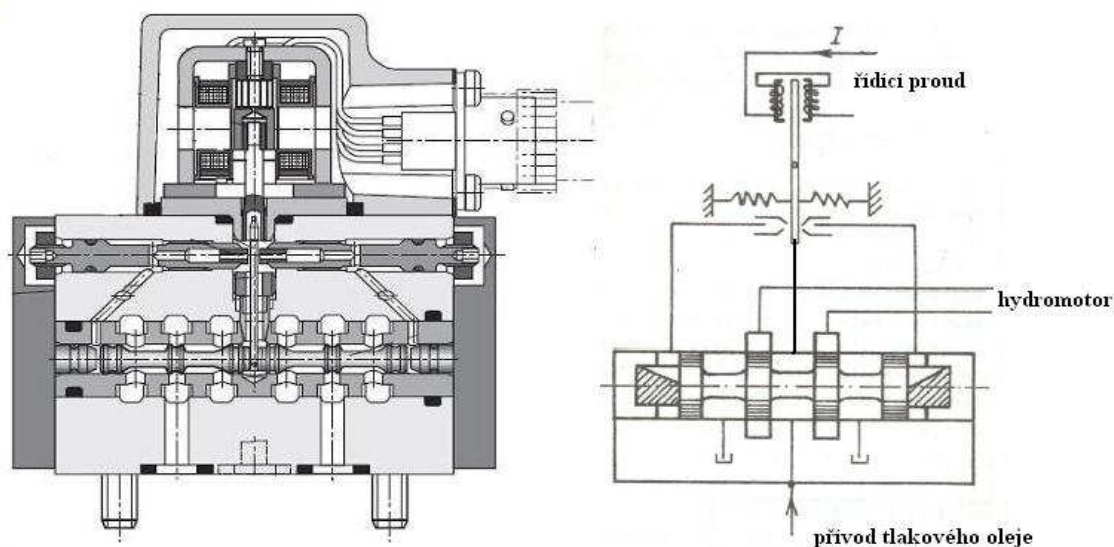
**Obr. 5 Hydromotor SAVAD 20-200 M019**

Motor SAVAD 20-200 M019 má zdvih 200mm a vyvine maximální sílu 20kN při plném provozním tlaku hydraulické kapaliny 25Mpa. Motor má oboustranně vyvedenou dutou pístnici o průměru 65mm. Jedna strana pístnice je vyvedena ven, je opatřena kotevním otvorem se závitem, a slouží pro připevnění provozní zátěže. Druhá strana je skryta v plášti válce a z této strany je do dutiny v pístnici instalován indukční snímač polohy. Je to klasický LVDT snímač se střídavým napájením 2V s frekvencí 5kHz. Nepohyblivá část snímače obsahující cívky je uchycena na plášť válce, vývody jsou zapojeny do konektoru na patě válce. Pohyblivé jádro je upevněno v dutině pístnice svěrným spojením. To je přístupné otvorem pro kotvení zátěže. Po povolení svěrného spojení lze jádrem v pístnici pohybovat a

sesouhlasit střední polohu pístnice s elektrickou nulou snímače. Toto nastavení je však možné provádět pouze při volném kotevním otvoru, musí se tedy provést ještě před montáží celků navazujících na pístnici. Těsnění pístnice v plášti je provedeno stěracími pryžovými kroužky. Na ně jsou kladeny protichůdné požadavky. Velké pracovní tlaky v motoru vedou na potřebu velké tuhosti kroužků. Ta by však způsobovala „přilepení“ v klidovém stavu a následný trhavý pohyb při rozjezdu. Protože trhavý pohyb je nepřijatelný, používá se těsnění „měkkí“ a počítá se s určitou netěsností a průsakem oleje. Ten se musí při provozu válců odvádět odpadním potrubím. Protože u plošiny je přívodní i odpadní potrubí nad úrovní válců a ani jeden z válců nestojí svisle patkou dolů, nemůže průsakový olej odtékat samospádem, ale je nutné ho aktivně odsávat pomocí čerpadla. Na boku válce je instalační místo pro řídicí servoventil. Protože hydraulické kanály a kotevní otvory válce se již neshodují se současnými servoventily, je mezi vlastní válec a servoventil vložena rozvodná deska, která upravuje rozteče otvorů na válci a servoventilu a zároveň nese dva akumulátory pro krytí špičkových odběrů (jeden na tlakové a druhý na odpadní větvi).

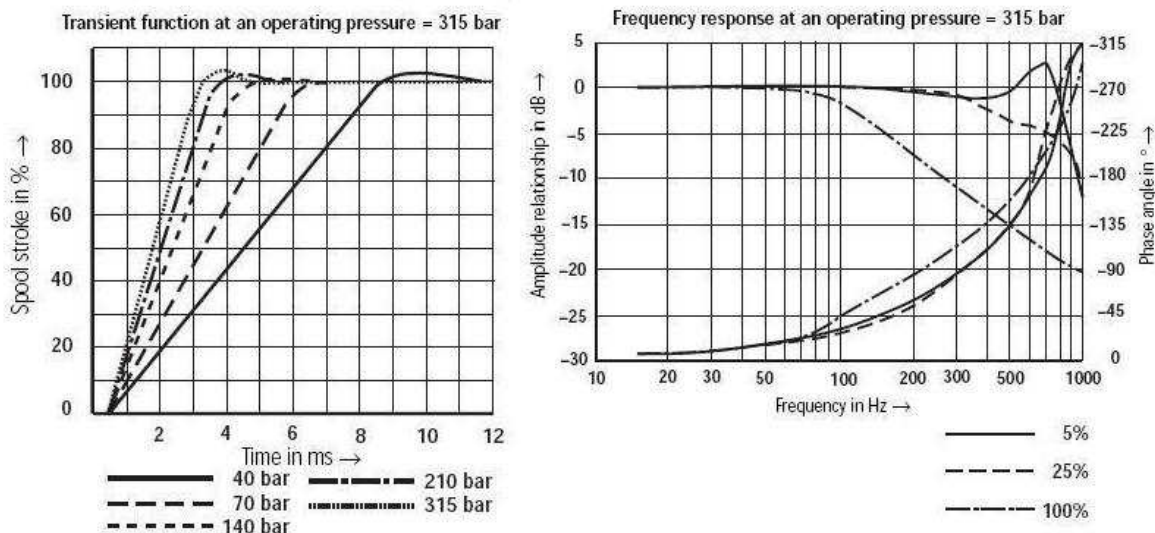
### 2.2.2. Servoventil

Pro řízení motoru je použit proporcionální servoventil Rexroth 4WS2EM 10. Jde o klasický dvoustupňový servoventil s vnitřní mechanickou zpětnou vazbou. Dvoustupňové provedení servoventilu k pohonu hlavního šoupátka využívá přímo energie tlakového oleje. Tím se podstatně snižuje výkon potřebný k řízení servoventilu a proto prakticky veškeré současné servoventily pracují na tomto principu. U dřívějších jednostupňových provedení byly řídicí proudy v řádech ampérů – typicky 1,5A na plné otevření šoupátka, dvoustupňové uspořádání pracuje s řídicími proudy v řádech desítek miliampérů. Použitý typ 4WS2EM 10 má dvě ovládací cívkky, každou na proud  $\pm 30\text{mA}$ . Cívkky lze řadit sériově nebo paralelně (při paralelním zapojení cívek je tedy řídicí proud  $\pm 60\text{mA}$ ). Protože při dvoustupňovém provedení není poloha šoupátka nastavována přímo řídicí cívkou, musí být servoventil vybaven vnitřní zpětnou vazbou polohy šoupátka. Tu je možno realizovat buď elektrickou cestou, kdy je šoupátko vybaveno snímačem polohy a regulace jeho polohy je realizována elektrickým regulátorem. Druhou, jednodušší možností, je realizace polohové regulace šoupátka hydraulicko - mechanickou zpětnou vazbou založenou na principu regulátoru klapka – tryska. To je i případ použitých servoventilů Rexroth. Skutečné provedení servoventilu převzaté z dokumentace výrobce [3] a jeho principiální schéma je na obrázku č.6.



Obr. 6 Uspořádání servoventilu Rexroth 4WS2EM 10 a princip jeho funkce

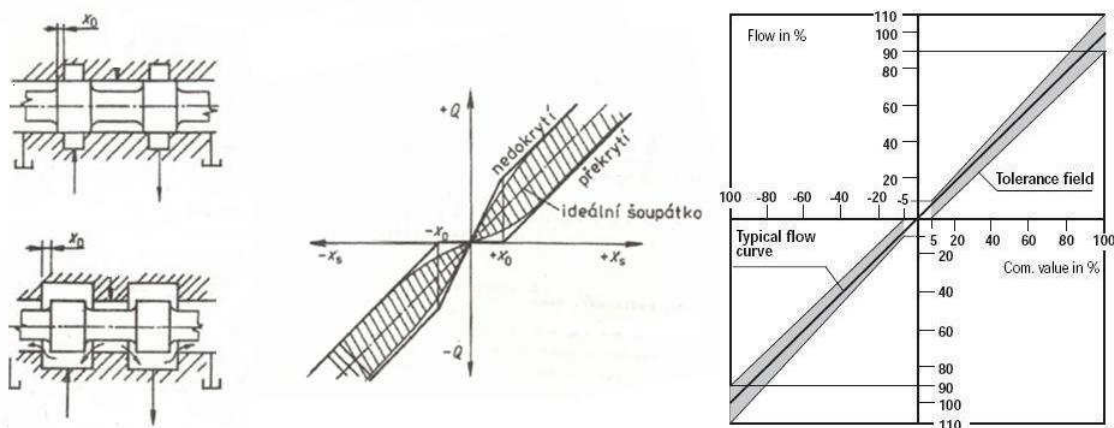
Servoventil je řízen dvojicí cívek. Magnetické pole vyvolané elektrickým proudem procházejícím cívkami vychýlí klapku vnitřního regulačního obvodu typu klapka - tryska. Vychýlením klapky se rozváží tlakové poměry na řídicích plochách šoupátka a šoupátko se posouvá do nové polohy. Posun šoupátka zpětně ovlivňuje polohu klapky (mechanická zpětná vazba), až dojde k opětovnému vyvážení tlakových poměrů a šoupátko se zastaví v nové poloze. Základní charakteristiky servoventilu jsou na obrázku č.7.



**Obr. 7 Základní charakteristiky servoventilu Rexroth 4WS2EM 10**

Z přechodové charakteristiky je patrná závislost rychlosti odezvy servoventilu na použitém tlaku oleje, což je ovšem zřejmé už z principu činnosti dvoustupňového servoventilu. Pro provozní tlak 25MPa používaný v rozvodech laboratoře je to cca 4ms na plné otevření. Frekvenční charakteristika je v dokumentaci publikovaná jen pro tlak 31,5MPa, ale dá se předpokládat, že pro 25MPa nedojde k přílišnému zhoršení.

Další vlastností servoventilu, která ovlivnila celý následný návrh ovládacího systému je provedení hran šoupátka. Existují v podstatě dvě možné varianty, šoupátko s překrytými nebo nedokrytými hranami. Třetí možnost, tedy nulové krytí, je prakticky nevyrobitelná a i kdyby byla, tak během provozu dojde časem prouděním kapaliny k opotřebení hran a tato varianta by přešla do varianty nedokrytí. Rozdíl obou provedení je vidět spolu s principem a skutečnou průtokovou charakteristikou použitého servoventilu na následujícím obrázku č.8.



**Obr.8 Provedení hran šoupátka a průtoková charakteristika servoventilu Rexroth 4WS2EM 10**

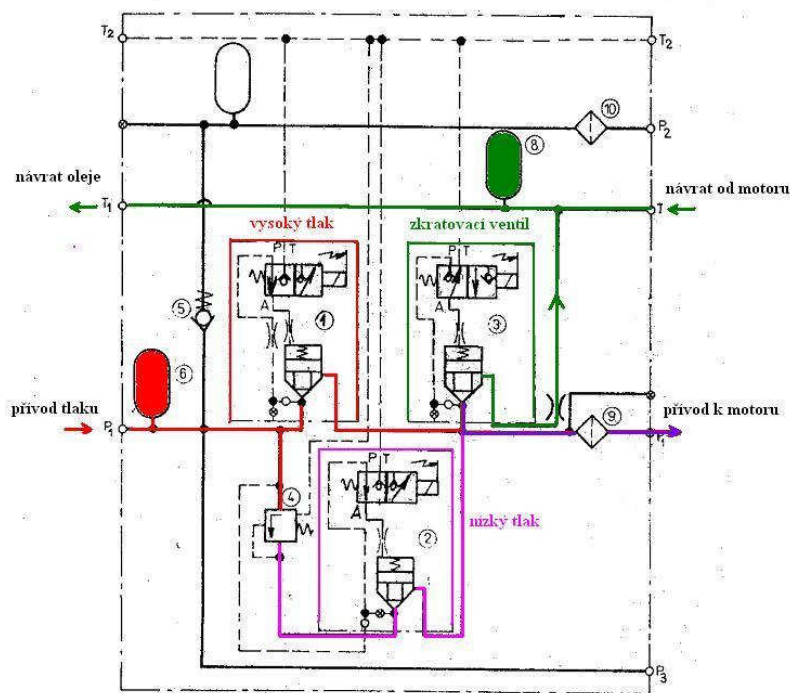
Varianta s překrytím má výhodu, že při nulovém buzení ventilu je průtok skutečně nulový a motor stojí. Za to se platí kolísáním rychlosti posuvu pístu motoru při přechodu šoupátka z jedné polaroty do druhé. Pro plynulý přechod by muselo šoupátko překonat zdvih překrytí v



nulovém čase, což je nerealizovatelné. Pro zachování plynulosti pohybu pístu motoru je nutno použít variantu s nedokrytím. Nepříjemným jevem tohoto provedení je ale neexistence nulového průtoku, takže ani při nulovém buzení servoventilu (nulovém proudu) není průtok nulový. Vzhledem k integrační povaze navazujícího hydromotoru dojde k pohybu jeho pístu rychlostí danou velikostí průtoku nedokrytím až k jedné z koncových poloh. Nulová rychlost pístu motoru (klid) se dá při zapnutém napájecím tlaku v hydraulickém obvodu docílit jen činností vnější polohové zpětné vazby. Použitý servoventil Rexroth 4WS2EM 10 má nedokryté hrany, je to běžná varianta u dynamicky řízených hydromotů. Další návrh ovládacího systému plošiny tedy musí počítat s tím, že zastavení pohybu plošiny v havarijních stavech není možno docílit přerušením napájení servoventilů.

### 2.2.3. Napaječ

Napaječ je zařízení, které připojuje hydraulické obvody plošiny k centrálnímu tlakovému rozvodu laboratoře. Vzhledem k velkému potřebnému průtoku k šesti hydromotorům jsou na plošině použity dva shodné napaječe. Ke každému je připojena trojice motorů. Napaječe jsou opět staré darované zařízení, vyrobené firmou Inova v roce 1980 s označením NOV 200 M10. Před použitím na plošině na nich byla opět provedena rekonstrukce. Ta spočívala v celkovém vyčištění a náhradě původních elektromagnetických ventilů novými. Blokové schéma napaječe převzaté z původní dokumentace firmy Inova [4] (kvalita bohužel odpovídá podkladu z roku 1980) a celkový pohled na jeden z napaječů je na obrázku č.9.



**Obr. 9 Blokové schéma a pohled na napaječ NOV 200 M10**

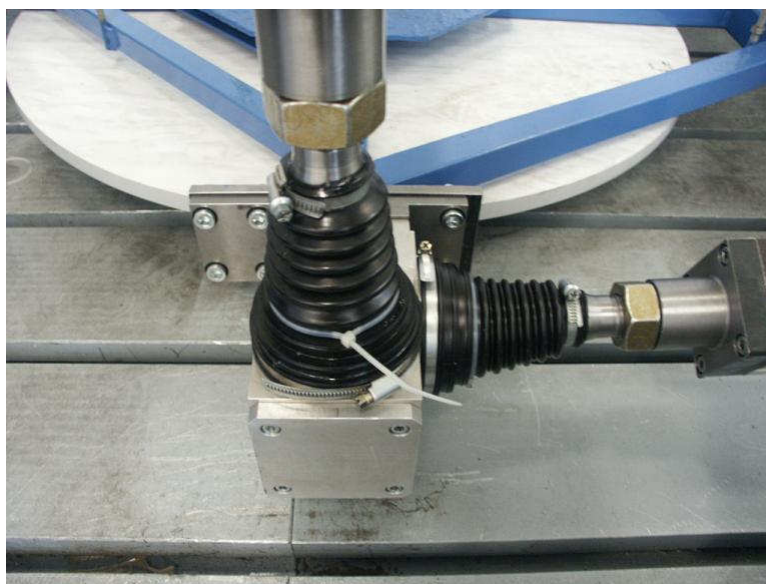
Na přívodu tlaku P1 je akumulátor pro krytí odběrových špiček (ve schématu pod číslem 6). Za ním následují dva paralelně zapojené elektromagnetické ventily. Ventil číslo 1 spíná ke spotřebiči plný napájecí tlak. V sérii s ventilem 2 je ručně nastavovatelný redukční ventil (4) a tato větev tedy umožňuje napájet spotřebič sníženým tlakem. Oba ventily 1 a 2 jsou v klidu zavřeny, otevřou se připojením elektrického napětí. Ventil č.3 má obrácenou funkci – tedy v klidovém stavu vede, připojením elektrického napětí se uzavře. Plní bezpečnostní funkci, bez elektrického napájení zkratuje tlakovou větev do odpadu. Při jakémkoliv výpadku elektrického napájení tím odpojí spotřebič od tlakového oleje. Všechny tyto tři ventily jsou dvoustupňové. K spínání hlavního průtoku slouží hydraulicky ovládaný ventil, který se ovládá

již klasickým dvoustavovým elektroventilem. Toto provedení je nutné vzhledem k velkým spínaným průtokům. Energie pro ovládání hydraulických ventilů se bere přímo z hlavního tlakového přívodu, odpad je sveden do pomocného odpadu T2. Tyto pomocné hydraulické obvody jsou ve schématu zakresleny čárkovaně. Napáječ dále obsahuje na výstupu ke spotřebiči olejový filtr (9), v hlavní odpadní větvi (T1) je opět akumulátor pro vykrytí odběrových špiček. Od hlavního přívodu je také přes jednosměrný ventil (5) odbočena větev pomocného napájení P2 s akumulátorem a filtrem (10). Větev P2 slouží k eventuelnímu stálému napájení bez vypínání ventily. Na plošině k ní bylo na jednom napaječi původně připojeno mazání kloubů, které se však nyní již nepoužívá, takže na obou napaječích je vývod zaslepen.

Z hlediska ovládání jsou tedy na každém napaječi tři dvoustavové ventily řízené stejnosměrným napětím 24V s odběrem 1,2A. Při funkci zařízení musí být sepnuty dva z nich, zkratovací vždy a k němu buď nízký nebo vysoký tlak.

#### 2.2.4. Pomocné hydraulické obvody

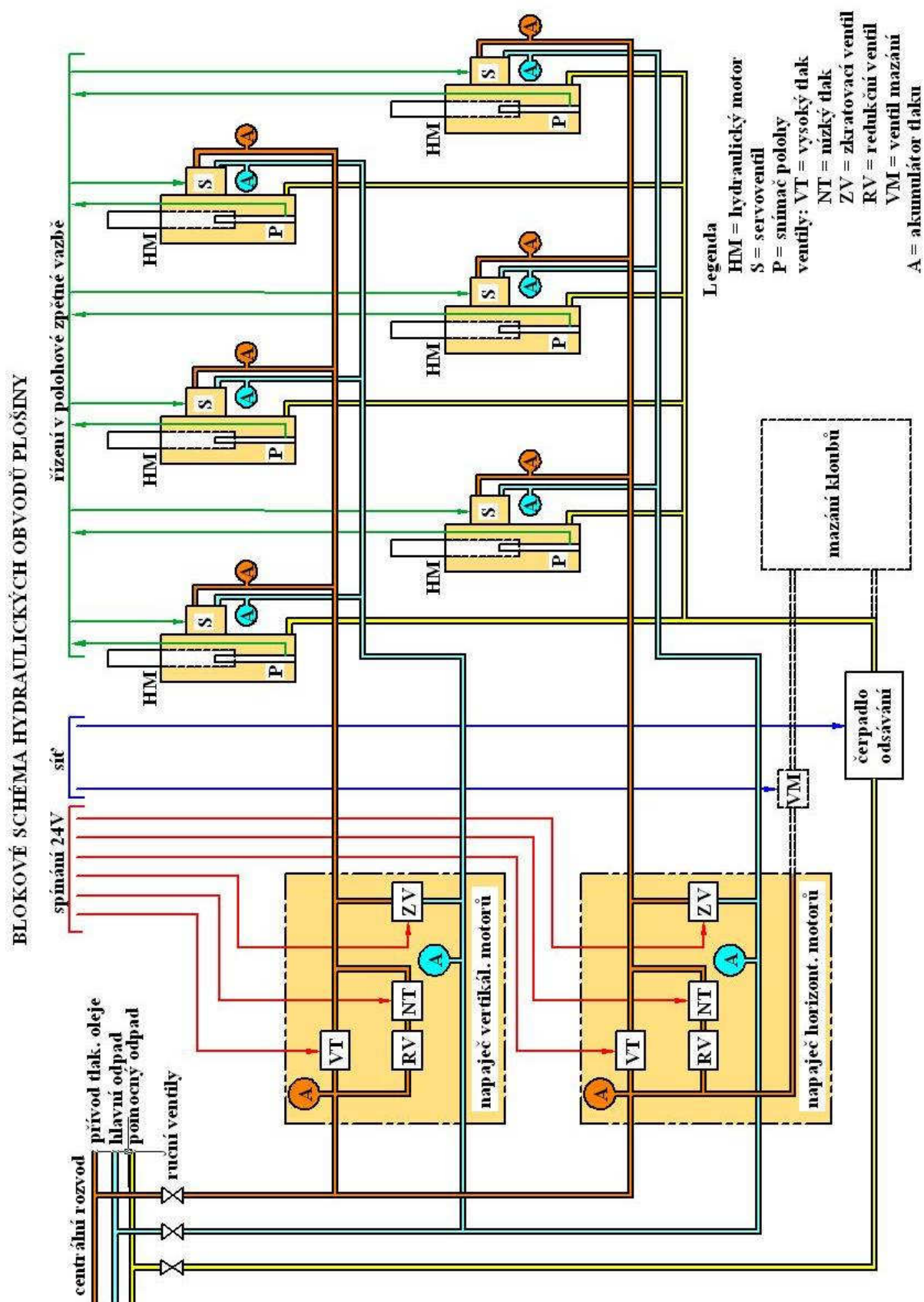
Pomocné hydraulické obvody tvoří systém aktivního odsávání průsakového oleje z těsnění hydraulických motorů. Aktivní odsávání zajišťuje čerpadlo poháněné klasickým asynchronním třífázovým motorem o příkonu 500VA. V původní verzi plošiny sem ještě patřilo mazání kulových kloubů tlakovým olejem. Mazání bylo připojeno do vývodu P2 napaječe horizontálních válců a spínalo se samostatně elektromagnetickým ventilem. Olej proteklý klouby se odsával společně s průsaky z motorů. Klouby jsou těsněny převlečnou pryžovou manžetou, která měla zabránit odtékání oleje do prostoru. Detail jednoho z kloubů je na obrázku č.10.



**Obr. 10 Detail kloubu**

Během provozu se ukázala malá spolehlivost těsnících manžet, které praskaly nebo docházelo k jejich sesmeknutí. To bylo příčinou častých „olejových“ havárií, kdy došlo k úniku tlakového oleje určeného pro mazání kloubů do prostoru plošiny. V současné době bylo tlakové mazání kloubů nahrazeno klasickým mazáním tukem pomocí standardních maznic. Přívody tlakového mazání a odsávání byly demontovány, ventil odpojen a vývod P2 na napaječi zaslepen. V původním návrhu ovládacího systému se však se systémem mazání počítalo a proto se v mé práci bude nadále tento obvod vyskytovat, i když se v současnosti již nepoužívá.

### 2.2.5. Celkové schéma hydraulických obvodů plošiny





### 2.2.6. Shrnutí funkcí ovládacího systému potřebných pro ovládání plošiny

Z předchozího popisu technických prostředků plošiny vyplývají následující funkce, které musí zajistit ovládací systém pro chod celého zařízení:

- polohová regulace šesti motorů, kde každý z motorů je osazen:
  - LVDT snímačem s napájením 2V na frekvenci 5kHz
  - servoventilem Rexroth 4WS2EM 10 s řídicím proudem  $\pm 30\text{mA}$  ( $\pm 60\text{mA}$ )
- spínání dvoustavových ventilů v napajecích:
  - celkem 6 ventilů s napájením 24V a každý s odběrem 1,2A
- spínání motoru čerpadla odsávání oleje:
  - třífázový motor s příkonem 500VA
- spínání ventilu mazání kloubů:
  - ventil na síťové napětí

## 2.3. NORMA ČSN EN ISO 13090-1

Norma ČSN EN ISO 13090-1 Vibrace a rázy – Pokyny pro bezpečnostní hlediska zkoušek a pokusů na lidech [1] je českou verzí evropské normy EN ISO 13090-1:1998. Jak už název napovídá, zabývá se problematikou bezpečnosti experimentálního zařízení, které bude použito pro vykonávání testů prováděných s člověkem. Požadavky kladené touto normou na zkušební zařízení se dají rozdělit do třech kategorií. V první kategorii jsou požadavky týkající se prostorového uspořádání celého experimentálního pracoviště, druhá řeší maximální přípustné expozice testované osoby vibracemi a rázy a třetí popisuje technické prostředky zabezpečení experimentálního zařízení.

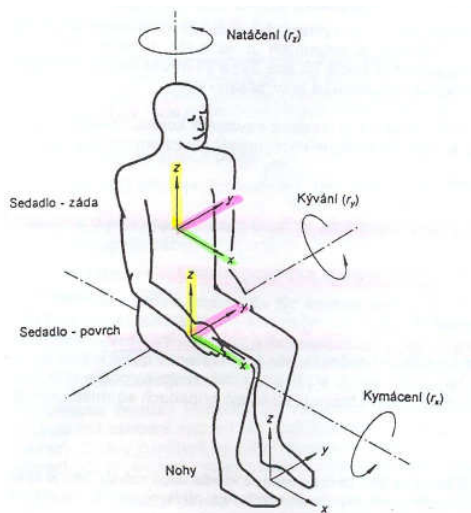
### 2.3.1. Požadavky na uspořádání experimentálního pracoviště

Tyto požadavky se týkají prostorového uspořádání celého experimentálního pracoviště a nesouvisí tedy přímo s ovládacím systémem a vykonáváním vlastního experimentu. Jde například o zajištění přístupových cest k testované osobě, umístění krytů chránících testovanou osobu od dotyku s nebezpečnými (např. rotujícími, horkými) částmi zařízení a bezpečné umístění (připoutání) osoby na testovací zařízení. Protože se tato část požadavků přímo netýká ovládacího systému, ale spadá do oblasti mechanické konstrukce zařízení, je zde tato problematika jen takto stručně nastíněna a v rámci mé práce není řešena. Tuto část normy zapracovali do svého návrhu autoři a konstruktéři mechanické části plošiny se šesti stupni volnosti. Dále se v této části normy řeší i prostředky komunikace operátora experimentu s testovanou osobou. Jde o zajištění vizuální i hlasové komunikace. Vizuální komunikace zde není problém, okno velínu je umístěno v bezprostřední blízkosti plošiny a operátor na testovanou osobu přímo vidí. Přímá hlasová komunikace však není možná, při provozu plošiny vzniká poměrně velký hluk a operátor je navíc oddělený sklem velínu. Proto je komunikace zajištěna pomocí vysílaček s náhlavní soupravou (hands-free), což je standardní řešení používané v rámci hydrodynamické laboratoře i u jiných experimentů.

### 2.3.2. Maximálně přípustné expozice testované osoby vibracemi a rázy

V této části norma lakonicky konstatuje, že „Zařízení by mělo být navrženo a vyrobeno tak, aby mohla obsluha při běžném provozu řídit pohybový podnět a velikosti vibrací a rázů nepřekračovaly očekávané hodnoty.“ Norma se zde odkazuje na jinou normu ČSN EN ISO 2631-1 Vibrace a rázy – Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím [5], která na dalších

třicetišesti stranách definuje „očekávané hodnoty“. Podstatou této normy je popis vlivu vibrací a rázů na člověka a metody hodnocení vibrací, které umožňují stanovit, zda je uvažovaný budící signál přípustný pro testy z člověkem nebo nikoliv. Určující veličinou pro stanovení přípustnosti budícího signálu je zrychlení, které se měří ve třech kolmých osách v několika místech, kde bude následně umístěna testovaná osoba. Místa měření jsou na obrázku číslo 11.



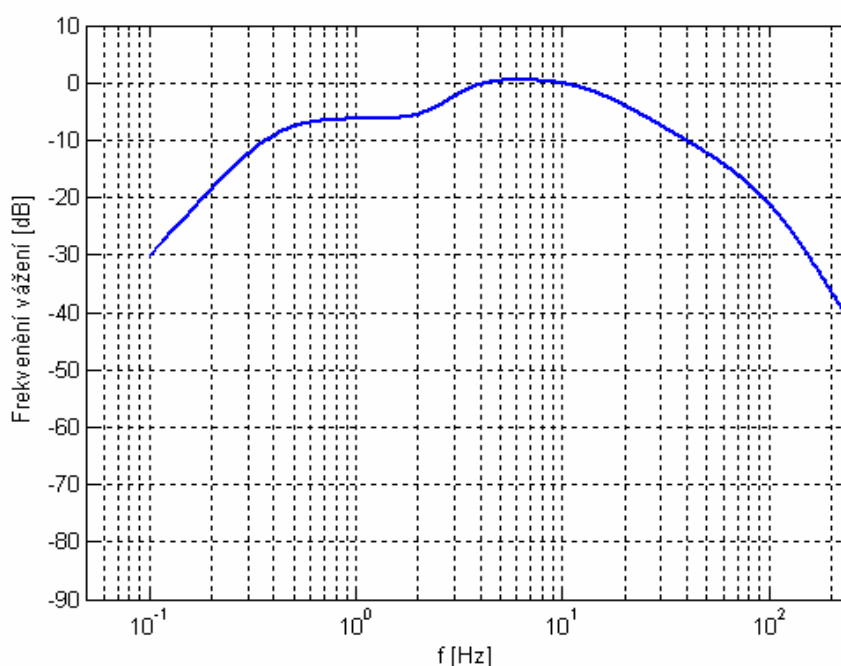
**Obr. 11 Kontrolní místa měření zrychlení**

Naměřené průběhy se pak hodnotí pomocí několika možných metod a pokud výsledné hodnoty nepřekračují stanovené limity, lze budící signál následně použít pro testy s člověkem. Základní metoda hodnocení se provádí pomocí vážené efektivní hodnoty zrychlení. Ta se

počítá dle vztahu

$$a_w = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3.2-1)$$

kde  $a_w(t)$  je vážené zrychlení v  $\text{m/s}^2$  a  $T$  je doba měření v sekundách. Příklad křivky frekvenčního vážení pro základní metodu jsou uvedeny v grafu na obrázku 12.



**Obr. 12 Příklad křivky frekvenčního vážení pro základní metodu**

Frekvenční vážení lze provádět buď analogovou nebo digitální metodou, vždy se používá propust typu Butterworthova filtru se sklonem asymptoty -12dB na oktavu. Metoda základního vážení však selhává v případě, kdy signál obsahuje vysoké špičky. Ty definuje činitel výkmitu, což je poměr hodnoty špičky signálu k efektivní hodnotě frekvenčně váženého signálu. Pokud je tento činitel větší než 9, metoda vážené efektivní hodnoty selhává, protože špičky zaniknou v integrálu přes celou dobu měření. Pak je třeba použít **metodu průběžné efektivní hodnoty** s krátkým integračním časem. Použitím krátké integrační časové konstanty se metodou hodnocení průběžné efektivní hodnoty zohledňují náhodné rázy a přechodové vibrace. Velikost vibrací je definována jako nejvyšší hodnota přechodových vibrací daná jako maximální hodnota  $a_w(t_0)$  v čase, která je definována vztahem

$$a_w(t_0) = \left[ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3.2-2)$$

kde  $a_w(t)$  je okamžité frekvenčně vážené zrychlení,  $\tau$  je doba integrace probíhajícího průměrování,  $t$  je čas a  $t_0$  čas pozorování. Tento výraz definující lineární integraci některé prameny (např. ISO 8041) doporučují nahradit exponenciální integrací dle vztahu

$$a_w(t_0) = \left[ \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{t_0} [a_w(t)]^2 \exp\left[-\frac{t-t_0}{\tau}\right] dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3.2-3)$$

Maximální hodnota přechodových vibrací MTVV je pak definována jako

$$MTVV = \max[a_w(t_0)] \quad (2.3.2-4)$$

tj. nejvyšší velikost  $a_w(t_0)$  odečtená během měřicího intervalu. Pro výpočty podle vztahů 2 a 3 se doporučuje se volit  $\tau = 1s$ .

Další metoda, která zohledňuje krátkodobé špičky je **metoda čtvrté mocniny dávky vibrací**. Použitím čtvrté namísto druhé mocniny časového průběhu zrychlení jako základu průměrování se dále zvýší citlivost na špičky v signálu. Kvartová hodnota dávky vibrací VDV [ $m/s^{1,75}$ ] je definována vztahem

$$VDV = \left[ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.3.2-5)$$

kde  $a_w(t)$  je okamžité frekvenčně vážené zrychlení a  $T$  je doba měření.

Pro vyhodnocování signálů ověřujících přípustnost budících signálů pro zkoušky se musí vždy použít základní metoda dle vztahu 1, další metody se mohou přidat jako pomocná kritéria pokud signál vykazuje krátkodobé špičky.

Metody průběžné efektivní hodnoty s exponenciální integrací dle vztahu 2.3.2-3 a 2.3.2-4 a čtvrté mocniny dávky vibrací dle vztahu 2.3.2-5 jsou ale doporučeny jako kritéria pro hodnocení naměřených průběhů zrychlení při ověřování nouzového zastavení zkušebního zařízení. Při nouzovém zastavování zařízení, kdy se právě mohou vyskytovat krátkodobé špičky, jsou tyto metody velmi vhodné.

Z uvedených hodnotících metod a postupů je patrné, že hodnocení vhodnosti vibračního signálu pro použití pro testy z člověkem je značně složité. Předpokládá vlastně ověřovací měření a není proto reálné, aby ovládací systém hlídal přípustnost budícího signálu v reálném čase. To ostatně nepožaduje ani norma – ta pouze předepisuje konstrukci ovládacího systému tak, aby vhodné a bezpečné budící signály mohl s jistotou volit operátor zkoušky. To je již reálně splnitelný požadavek.

Pro generování budicích signálů jsou v podstatě možné dva principy. První možností je generování průběhů ovládacím systémem v reálném čase. Řídicí systém obsahuje signálový generátor, operátor před zkouškou zvolí nastavení – tvar, amplitudu a frekvenci signálu, dobu jeho trvání a spustí zkoušku. Řídicí systém v reálném čase podle zadaných parametrů generuje žádanou hodnotu. Tento způsob je ale použitelný jen pro periodické signály a lze ho rozumně použít pro jednoosé zatěžování. V případě plošiny, kdy je prostorový pohyb složen z pohybů šesti motorů, by tento způsob byl náročný buď na představivost operátora nebo v případě zahrnutí kinematického schématu plošiny na výpočetní výkon. Vlastní praxe z řízení jiných experimentů v laboratoři navíc ukazuje, že tento princip je náročný na dokonalou a dlouhodobou soustředěnost operátora. Pokud totiž zkoušky trvají dlouho a jedná se opakování totožných úkonů (např. se testuje několik typů sedaček s několika lidmi a signály se dokola opakuji), je udržení dlouhodobé pozornosti operátora velmi obtížné. Malá chyba třeba v podobě posunutí nebo vynechání desetinné čárky, například při zadávání amplitudy, pak může mít fatální následky. Po startu zkoušky jsou překročeny limitní hodnoty a následně dojde k „otestování“ bezpečnostních obvodů. V případě testů z člověkem je tato situace velmi nepříjemná, v testované osobě klíčí nedůvěra ke zkouškám a operátorovi. Pokud dojde navíc k chybě v zadání délky signálu, nejsou hlídané limitní hodnoty amplitud překročeny, bezpečnostní systém nereaguje a osoba je vystavena nepřipustné expozici. Z těchto důvodů je lepší pro tyto testy používat druhou možnost generace – čtení žádaných hodnot z předem vytvořených datových souborů. Tato možnost sice není tak operativní jako ta první, průběhy je nutné vytvářet předem, ale to je jediná nevýhoda. Pro testy se v praxi navíc povětšinou používá shodná sada signálů, takže menší operativnost při zadávání zkoušky není kritická. Výhody tohoto principu pak naprosto převažují. Signály jsou jednoznačně definovány tvarem, hodnotou, frekvencí i délkou. Lze používat i neperiodické průběhy, náhodné signály, šumy nebo reálně změřené signály z vozovky. Shodnost signálu při opakování je zaručena, chyba operátora může spočívat maximálně ve volbě jiného souboru. Tím sice dojde k nepoužitelnosti výsledků, ale testovaná osoba není vystavena žádným nežádoucím vlivům. Použitím tohoto principu se zcela splní požadavky normy, operátor zkoušky má jednoduše zajištěno, že signály nepřekračují očekávané hodnoty. Soubory se signály mohou být navíc předem „certifikovány“ pro použitelnost s člověkem. Mohou být na zařízení ověřeny pokusným spuštěním bez člověka, měřením odezvy na neživé zátěži a následným výpočtem podle výše naznačených kritérií ověřena jejich vhodnost. V případě plošiny pak odpadá i nutnost řešit v reálném čase kinematiku plošiny, soubory mohou obsahovat přepočítaná data pro polohy pístnic jednotlivých motorů, jejichž kombinací dojde k požadovanému pohybu plošiny.

Vzhledem k výše uvedenému jsem se pro zadávání řídicích signálů pro plošinu jednoznačně rozhodl pro druhou variantu. Požadovaný průběh dráhy nějakého konkrétního bodu v čase se nejprve pomocí softwaru zahrnujícího kinematické schéma plošiny přepočte do časového záznamu poloh jednotlivých motorů. Výsledek se uloží do souboru a ten bude následně sloužit jako zdroj žádaných hodnot pro regulaci polohy motorů. Tento způsob zároveň plně vyhovuje i požadavkům normy, zařízení umožňuje operátorovi řídit zkoušku tak, aby expozice člověka při testu nepřekračovala očekávané a limitní hodnoty. Zároveň vylučuje i možnost chyby operátora vzniklou nepozorností při volbě parametrů při dlouhodobých opakováních zkoušek.

### **2.3.3. Technické prostředky zabezpečení experimentálního zařízení**

Tato část normy je nejvíce konkrétní a předepisuje již přímo funkce a prvky, které musí zařízení pro testování s člověkem obsahovat. Jejich výčet je uveden v následujícím přehledu.

### **Přehled funkcí a prvků testovacího zařízení pro zkoušky s člověkem:**

- nouzové zastavení:
  - možnost musí mít jak operátor, tak přímo testovaná osoba
  - ovládací prvky pro nouzové zastavení musí být okamžitě a snadno přístupné a musí být jasně a jednoznačně označeny
- ovládací prvky a displaye obsluhy musí obsahovat:
  - údaje o stavu zařízení, tj. zda je v klidu bez energie, připraveno k zahájení pohybu, nebo v pohybu
  - údaje o stavu bezpečnostních obvodů a nastavených limitních hodnotách, kdy dojde k jejich aktivaci
  - údaje o parametrech zkoušky
  - postupy zapínání a vypínání by měly tvořit logickou posloupnost, jejíž kroky jsou vzájemně blokovány, aby se zabránilo nesprávné činnosti
  - ovládací prvky nesmí při použití vyvolávat nežádoucí přechodové děje na zařízení
- nezávislé monitorovací obvody zajišťují:
  - sledování pohybu stolu budiče (plošiny)
  - sledování parametrů řídicího systému, které charakterizují jeho standardní provoz, (např. přítomnost napájení, integritu zpětnovazebních obvodů atd.)
  - při jakémkoliv překročení předem nastavených hodnot sledovaných parametrů vyvolají nouzové zastavení
- definovaná činnost po výpadku elektrické sítě
  - hydraulické obvody obsahující akumulátory mají zásobu energie i při zastavení generátoru, tlak v obvodech navíc nedefinovaně kolísá a klesá
  - řídicí nebo havarijní systém musí proto zůstat v činnosti i po výpadku hlavního napájení a bezpečně zastavit pohyb zařízení

Postup nouzového zastavení pohybu, který je spuštěn činností některého z výše uvedených principů, musí uvést zařízení do klidu **BEZPEČNÝM A ŘÍZENÝM** způsobem. K účelu otestování nouzového zastavení by se za simulovaných podmínek poruchy měly pořídit záznamy zrychlení ve třech kolmých směrech na místě pokusné osoby a výsledné naměřené průběhy zrychlení musí splňovat jedno z následujících kritérií:

- $MTVV \leq 10\text{m/s}^2$   
počítá se průběžná celková vážená efektivní hodnota exponencionálně průměrovaná s časovou konstantou 1s dle vztahů 3 a 4
- $VDV \leq 17\text{m/s}^{1.75}$   
počítá se hodnota dávky kvartových vibrací dle vztahu 2.3.2-5.

Pro účely ověření by se měly simulovat následující poruchy:

- výpadek síťového napájení
- náhlé přerušení zpětné vazby
- činnost tlačítek nouzového zastavení
- použití budicího signálu překračujícího povolené hodnoty

## 2.4. KONCEPCE OVLÁDACÍHO SYSTÉMU

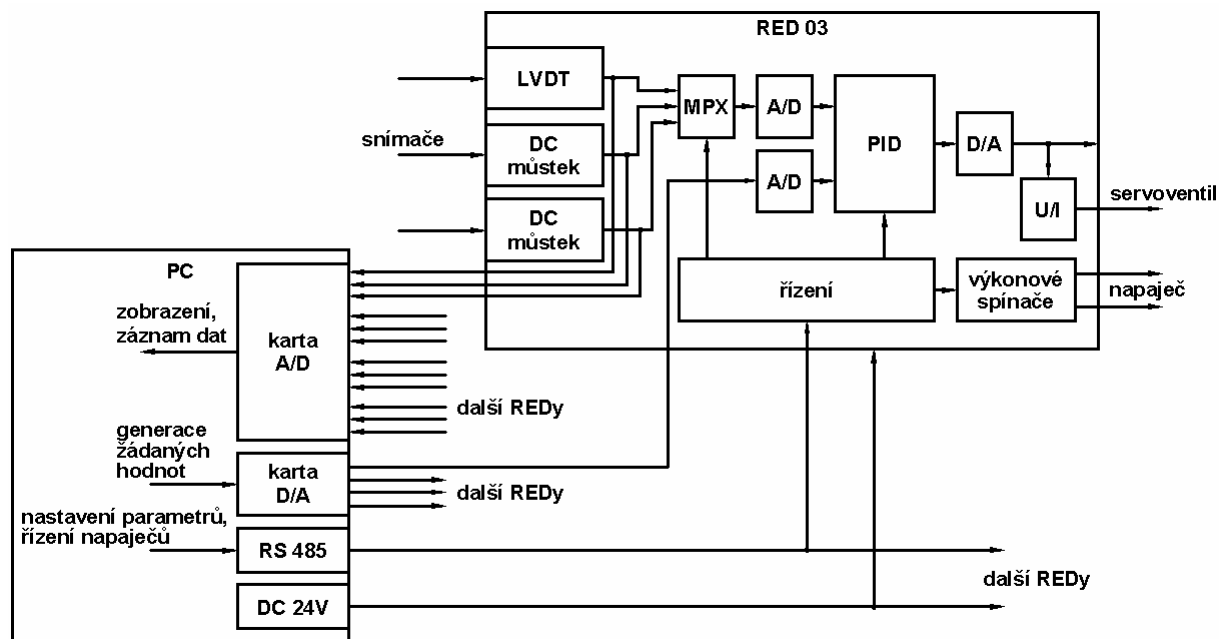
### 2.4.1. Úvodní úvahy

Volba principu ovládacího systému vycházela ze dvou celkem protichůdných požadavků. Na jedné straně musel ovládací systém splňovat všechny potřeby pro ovládání jednotlivých systémů plošiny (viz. shrnutí v kapitole 2.2.6). Zároveň je třeba vyhovět požadavkům normy ČSN EN ISO 13090-1 (viz. kapitoly 2.3.2 a 2.3.3), protože jedním s hlavních využití zařízení budou testy mechanických celků s člověkem. Tím protichůdným požadavkem byla pochopitelně pořizovací cena, která byla limitována finančními prostředky vyčleněnými vedením výzkumného záměru pro realizaci tohoto zařízení.

Realizace ovládacího systému se mohla provést v zásadě dvěma cestami. První možností byl nákup ovládacího systému od některého z výrobců, druhou vlastní stavba. Na počátku pochopitelně bylo prověření možností nákupu hotového ovládacího systému. Většina firem zabývajících se výrobou hydraulických systémů a strojů má v nabídce i nějaký řídicí systém. Problém spočívá v tom, že systém je většinou postaven univerzálně, aby vyhověl většině standardních aplikací. Plošina se šesti stupni volnosti, navíc s požadavky normy pro testy s lidmi, však bohužel standardní aplikací není. Firmy pochopitelně staví i jednoúčelové zkušební stroje a k nim dodají řídicí systém na míru. V tom případě ale chtějí dodat celé zařízení včetně mechanické a hydraulické části. Zadání typu „postavte plošinu se šesti stupni volnosti“ na „zelené louce“ je pro ně to správné zadání. Cena tohoto řešení však mnohonásobně přesahovala finanční možnosti. V našem případě byla mechanická konstrukce plošiny navržena a postavena svépomocí a hydraulický systém byl sestaven z použitých repasovaných prvků. Samostatná dodávka jednoúčelového řídicího systému pak buď přestávala být pro firmy zajímavá nebo cenová hladina vývoje (respektive nutných úprav univerzálního systému) opět přesahovala možnosti výzkumného záměru. Jako příklad potíží takového řešení je v následující kapitole uveden příklad řídicího systému české firmy Inova Praha, který je v hydrodynamické laboratoři úspěšně používán pro řízení ostatních hydraulických strojů.

### 2.4.2. Popis řídicího systému Inova

Řídicí systém dodávaný firmou Inova byl v době poptávky na řízení plošiny založen na číslicových PID regulátorech RED 03. Jejich provedení vychází z předchozího typu RED 02, který je používán v naší laboratoři a koncepčně spadá do devadesátých let minulého století. Jeho základem je procesor Motorola 6008, který softwarově (programem uloženým v paměti Eprom) řeší PID regulátor jednoho hydromotoru. Druhý procesor Zilog Z80 se používá pro komunikaci s nadřazeným PC a nastavení vlastností. V regulátoru jsou dále pozice pro tři předzesilovače vstupních snímačů. Standardně je RED osazen jedním modulem pro zpracování signálu z indukčního snímače polohy LVDT a dvěma moduly stejnosměrných zesilovačů pro zpracování signálu z tenzometrických snímačů, například siloměrů. S nadřazeným PC je RED propojen sběrnici SEBUS, což je směsice sériové linky RS485, analogových signálů a napájení. Po sériové lince se nastavují základní parametry regulace – konstanty PID a volí se jeden ze snímačů, který je použit jako zpětnovazební. Dále lze nastavit havarijní meze, při jejichž překročení dojde k okamžitému zastavení pohybu. Sériovou linkou se ovládají i silové spínače ventilů napaječe. Regulační perioda se dá nastavit na jednu nebo dvě milisekundy. Každý regulátor je adresován tříbitovou adresou, na jedné sběrnici tak může být maximálně osm REDů. Analogovými linkami jsou z REDu vedeny signály z výstupů modulů vstupních snímačů pro účely zobrazení a záznamu a z počítače do REDu žádaná hodnota pro regulaci. Počítač musí být tedy vybaven kartami pro vstup a výstup analogových signálů. Blokové schéma systému je na obrázku číslo 13.



Obr. 13 Blokové schéma řídicího systému Inova

Skutečné provedení regulátoru a jedna ze skupinek REDů používaných v hydrodynamické laboratoři je na obrázku 14.



Obr. 14 Skutečné provedení regulátoru RED

V otevřeném REDu jsou vlevo vidět tři moduly předzesilovačů, vedle nich procesor Z80 s pamětí EPROM. Druhý procesor s pamětí a obvody A/D, D/A převodníků jsou ukryty pod moduly zesilovačů.

Po dlouholetém provozování tohoto systému v laboratoři lze konstatovat, že samotné REDy pracují spolehlivě. Kamenem úrazu je nadřazené PC, na kterém je ale závislá funkčnost celého systému. Je to standardní počítač, který je vybaven kartami převodníků pro vstup a výstup analogových signálů, kartou linky RS485 a bývá v něm integrován i samostatný napájecí zdroj 24V pro napájení REDů. Počítač je provozován pod klasickými Windows a běží na něm uživatelský software. Ten musí zaprvé vždy po zapnutí napájení nastavit všechny konstanty v REDu a co je podstatnější, po startu zkoušky v něm běží generace žádané hodnoty. Spolehlivost celku tedy závisí na stabilitě operačního systému Windows a v případě jakékoliv poruchy v generaci žádané hodnoty mohou havárii zabránit jen vhodně zvolené a v REDu nastavené meze. Toto je jeden z důvodů, proč tento systém nebyl pro řízení plošiny použit. Druhým důvodem je omezení počtu REDů, které jsou standardně připojitelné k jednomu PC. I když by adresace umožňovala osm, skutečnost jsou čtyři. Na tento počet je dimenzován konektorový blok na zadní straně PC, do kterého se připojují sběrnice SEBUS a výkon napájecího zdroje. Zvýšení počtu připojených REDů by znamenalo předělat tento blok, což ještě není neřešitelné. Horší je, že na čtyři REDy je „dimenzován“ i ovládací software.

Vzhledem k tomu, že karty A/D a D/A převodníků jsou speciály dodávané Inovou, nelze na ně obecně uživatelsky přistupovat (např. pomocí Labview) a koncový uživatel je odkázán na software od dodavatele. Rozšíření softwaru na potřebných šest REDů tedy nejde vyřešit „svépomocí“. Tím se kruh uzavírá a cesta končí - jak jinak, než na finanční stránce.

Závěrem této kapitoly se sluší poznamenat, že Inova Praha „nespala“ a v současné době nabízí zcela nový modulární digitální řídicí systém, ze kterého lze poskládat prakticky libovolnou uživatelskou konfiguraci. I generace signálu pod Windows je již historií, systém pracuje s průmyslovým počítačem s real-time operačním systémem. Kdybychom začínali se stavbou plošiny nyní, patrně by základ řízení tvořil právě tento systém, který by byl doplněn monitorovacími obvody dle požadavků normy. Bohužel v době rozhodování o ovládacím systému plošiny nebylo toto řešení ještě k dispozici.

### 2.4.3. Zvolená koncepce ovládacího systému

Z výše popsaných důvodů tedy vyplynulo řešení – postavit ovládací systém z nějakých standardně vyráběných komponent, které jsou programovatelné opět v nějakém standardním prostředí a v něm vytvořit jednoúčelovou aplikaci pro řízení plošiny.

Analýzou funkcí potřebných pro řízení plošiny a zároveň požadovaných normou pro testy s člověkem jsem zvolil následující koncepci ovládacího systému.

Ovládací systém bude rozdělen na dvě části. První částí bude „**řídicí systém**“. Ten zajistí všechny funkce potřebné pro činnost plošiny v normálním provozu. Nad ním bude bdít „**bezpečnostní systém**“, který bude nepřetržitě sledovat stav zařízení a v případě poruchy zajistí bezpečné zastavení plošiny. Tato koncepce plně odpovídá požadavkům normy (viz. kapitola 2.3.3) a umožňuje realizovat kompletní ovládací systém s minimálními možnými náklady. Bezpečnostní systém totiž plošinu neřídí – nemusí tedy zdvojit regulační funkce řídicího systému, ale jen bezpečně zastavuje pohyb v případě poruchy.

Řídicí systém tedy plní tyto funkce:

- PID regulace polohy šesti hydraulických motorů, žádané hodnoty poloh jsou zásadně datové soubory (viz rozbor v kapitole 2.3.2)
- ovládání dvoustavových prvků (ventily napaječů, mazání, odsávání)
- realizuje uživatelské prostředí pro komunikaci operátora se zařízením

Bezpečnostní systém má hlídat správnou funkci zařízení. To je ale značně obecný pojem, proto jsem se po prostudování požadavků normy rozhodl pro monitorování následujících funkcí:

- přítomnost napájení
- činnost hydraulického agregátu
- tlačítka „TOTAL STOP“
- pravidelnost běhu regulační smyčky hlavního systému (obvod watchdog)
- překročení vymezeného zdvihu pístnic  $\pm 70\text{mm}$
- překročení zrychlení pístnic jednotlivých motorů

Hlídaní těchto funkcí plně zajišťuje bezpečnost testované osoby, překročení mezí kterékoliv z nich vyvolá okamžité zastavení plošiny. Mimo to bude bezpečnostní systém dále hlídat i systémy, jejichž porucha neohrozí osobu, ale ohrožuje funkčnost samotného zařízení. Sem patří hlavně průchodnost hydraulických cest a činnost odsávání průsakového oleje. Výpadek těchto systémů nejprve upozorní obsluhu, aby mohla zastavit činnost zařízení standardním ukončením zkoušky. Teprve v případě nereagování operátora odstaví zařízení automaticky. Výsledek kontroly všech hlídaných funkcí se dle požadavků normy bude předávat základnímu systému a ten zajistí zobrazení jejich stavu na operátorském stanovišti.



### 3. ŘÍDÍCÍ SYSTÉM

#### 3.1. **HARDWARE ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU**

##### 3.1.1. **Počítačové jádro**

Při rozhodování o komponentech, ze kterých bude sestaveno jádro řídicího systému, bylo jasné, že vzhledem k požadované bezpečnosti nemůže být jádro systému postaveno na obyčejném PC s operačním systémem Windows, ale základem musí být nějaký průmyslový standard s vysokou spolehlivostí a stabilním operačním systémem. Protože systém bude realizovat přímo regulační smyčky je potřeba navíc aplikaci velmi přesně časovat. Tomu pak nejvíce vyhovují speciální operační systémy reálného času. Při volbě konkrétního řešení jsem vycházel ze svých dlouhodobých zkušeností s produkty firmy National Instruments. S pražským zastoupením této firmy udržuji dlouholetý kontakt, pravidelně se účastním jejich školení a seminářů. Jejich produkty jsou prakticky standardem v oblasti sběru dat, se zaručenou spolehlivostí a certifikovanou přesností. Zákazníci jsou navíc podporováni bohatým zázemím světové firmy, zajišťujícím poradenství, servis, upgrade, atd. V laboratoři se používají pro sběr dat jejich multifunkční karty, všemožné aplikace pro záznam a zpracování dat jsou tvořeny v programovém prostředí Labview. Když navíc již v té době měla firma v sortimentu průmyslový počítač pracující s operačním systémem reálného času, jehož výkon postačoval pro požadované funkce, byla volba více než jasná.

Základem řídicího systému se tedy stal průmyslový systém PXI-1002 od National Instruments. To je vlastně vana s napájecím zdrojem a čtyřmi pozicemi pro umístění modulů. Do první pozice se umísťuje modul kontroléru, další tři jsou k dispozici pro vstupně – výstupní karty. Moduly jsou propojeny sběrnicí PXI, což je sběrnice vyvinutá v National Instruments. V podstatě je to standardní sběrnice PCI používaná v klasickém PC rozšířená o synchronizační linky. Pomocí nich lze synchronizovat okamžiky sběru dat z více modulů. Systém navíc obsahuje přesný hodinový signál s frekvencí 1MHz, který lze využít k hardwarovému časování softwarové smyčky.

Jako výpočetní jednotku jsem zvolil kontrolér NI PXI-8176, což byla v té době prakticky jediná možnost vyhovující výkonem předpokládané aplikaci. Kontrolér je osazen procesorem Intel Pentium III s frekvencí 1,2GHz, má 128MB operační paměti a 18GB pevný disk. Dále je vybaven disketovou mechanikou, standardními konektory klasického PC (klávesnice, myš, monitor, USB,...) a 100Mbit ethernetem. Kontrolér může pracovat buď pod operačním systémem Windows nebo ho lze provozovat se speciálním operačním systémem reálného času od National Instruments. V tomto režimu je možné kontrolér propojit pomocí ethernetu protokolem TCP/IP s dalším počítačem. Na něm lze vytvořit operátorskou konzoli pro programování kontroléru nebo pro uživatelskou obsluhu již hotové aplikace. Ta běží kompletně na kontroléru, v případě nějaké poruchy ve spojení nebo výpadku připojeného počítače nedojde k ohrožení běhu aplikace, jen ji nelze v daný okamžik ovládat. S tím se musí při tvorbě aplikace počítat a ošetřit tento možný stav nějakým vhodným způsobem. Veškeré další podrobné údaje jsou uvedeny v uživatelském manuálu [6].

Dále bylo nutné vybrat komponenty pro vstup a výstup analogových signálů. Výchozím požadavkem bylo šest analogových vstupů a šest analogových výstupů. Žádná multifunkční karta však takovouto kombinaci vstupů a výstupů neobsahuje, většinou karty obsahují 16 vstupů a jen dva výstupy. Proto jsem musel volit kombinaci dvou samostatných karet – jednu pro vstupy a druhou pro výstupy. Jako vstupní kartu jsem zvolil PXI 6040E. To je klasická karta s multiplexovanými vstupy. Má 16SE nebo 8DI vstupů a 12ti bitový A/D převodník s maximální rychlostí vzorkování 500kS/s. Z 16ti vstupů se zatím využije 6 pro vstup signálů za snímačů polohy pístnic a zbylé vstupy zůstanou volné pro eventuelní měření dalších kanálů při experimentech na plošině. Vstupy karty jsou schopné zpracovat elektrické napětí v několika softwarově nastavitelných úrovních (od  $\pm 50\text{mV}$  do  $\pm 10\text{V}$ ). Karta má i dva

analogové výstupy, což je pro plošinu málo a tak zůstaly nevyužity. Detailní popis všech vlastností karty je uveden v katalogovém listu [7]. Pro analogové výstupy jsem použil kartu PXI 6713. Ta obsahuje celkem osm analogových výstupů řízených 12ti bitovými D/A převodníky s maximální rychlostí 1MS/s. Výstupní napětí je v rozsahu  $\pm 10V$ . Z osmi výstupů je využito prvních šest pro řízení servoventilů, zbylé dva jsou nevyužity. Popis je opět v katalogovém listu [8].

Pro ovládání dalších obvodů plošiny (spínání ventilů napaječů, čerpadla,...) jsou potřeba logické výstupy. Pro zpětnou kontrolu stavu (např. kontrola proudové ochrany motoru čerpadla) jsou potřeba i logické vstupy. Každá z výše uvedených karet obsahuje jeden osmibitový port TTL, jehož jednotlivé bity lze programovat jako vstupy nebo výstupy. Celkem je tedy na dvou kartách k dispozici 16 logických linek. To se zdá na první pohled dostatečný počet, ale bližším rozбором potřebné komunikace s obvodou bezpečnostního systému (viz kapitola 4) se tento počet ukázal nedostatečný. TTL vstupy jsou navíc choulostivé na přepětové špičky a výkon výstupů je malý pro spínání silových relé. TTL vstupy a výstupy by tedy musely být doplněny dalšími obvody, které by je přizpůsobily navazujícím obvodům. Z těchto důvodů jsem se nakonec rozhodl vyřešit problematiku dvoustavových vstupů a výstupů samostatnou kartou PXI 6528. Ta obsahuje 24 opticky oddělených vstupů a 24 reléových výstupů. Pro „komunikaci“ se silovým rozvaděčem je proto naprosto ideální. Vstupy bez problému přímo zvládnou 24 voltů (maximum je 60V), výstupy mohou spínat až 150mA, což stačí na výkonová relé. Výchozí stav výstupních relé lze navíc naprogramovat do karty, takže okamžitě po zapnutí napájení se výstupy uvedou do požadované konfigurace. Karta dále obsahuje čítač-časovač, který lze naprogramovat jako obvod watchdog. V tomto stavu čítač kontroluje předem nastavený časový interval komunikace softwaru s touto kartou. Lze tak hlídat pravidelnost běhu aplikace, stačí v cyklu číst například stav vstupů karty. Překročí-li doba mezi dvěma odečty předem nastavený interval, dojde k vyslání poruchového signálu. Ten lze programově přiřadit na libovolný reléový výstup karty, který může být použit jako signál pro nouzové zastavení. To je přesně funkce požadovaná normou, jakýkoliv kolaps řídicího systému nebo jen nepravdivost chodu je okamžitě detekován a vyslán reléovým výstupem. Detailní popis karty je opět v jejím data sheetu [9]. Nákup této karty se proto ukázal jako velmi výhodný, popsané funkce karty hodně zjednodušily následné obvodové řešení.

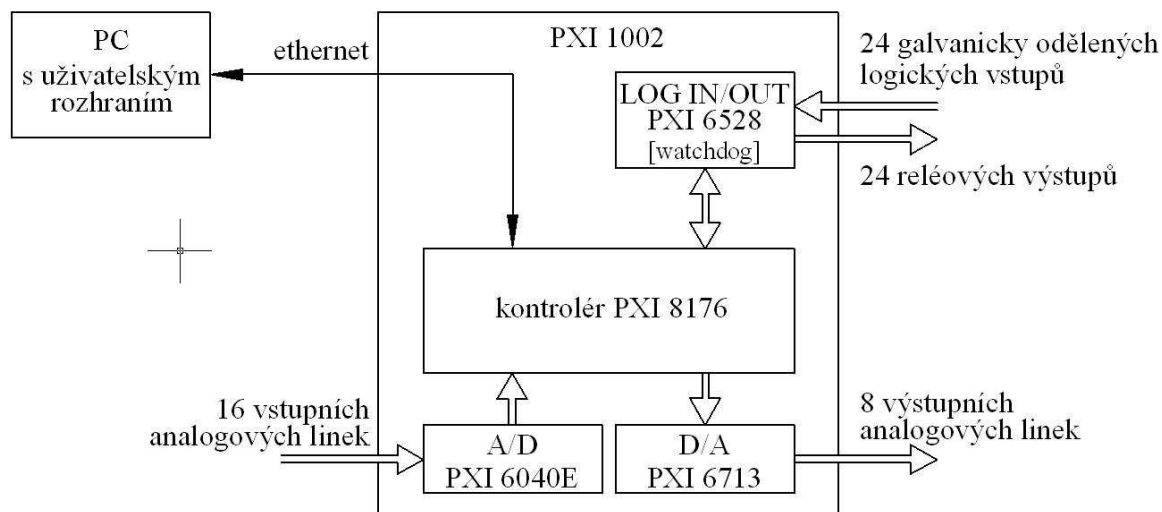
Pohled na vanu PXI 1002 osazenou kontrolérem NI PXI-8176 a kartami PXI 6040E, PXI 6713 a PXI 6528 je na obrázku 15.



**Obr. 15 Kompletně osazený systém PXI-1002**

Aby bylo možné používat tento systém v režimu real-time, je nutné vytvořit uživatelské a programátorské prostředí na jiném počítači. Pro tyto účely byl použit již klasický PC osazený procesorem AMD Athlon 2.18GHz, 1GB RAM a 40GB diskem s operačním systémem Windows XP Professional. Na počítači je nainstalován software Labview 8.2 s real-time

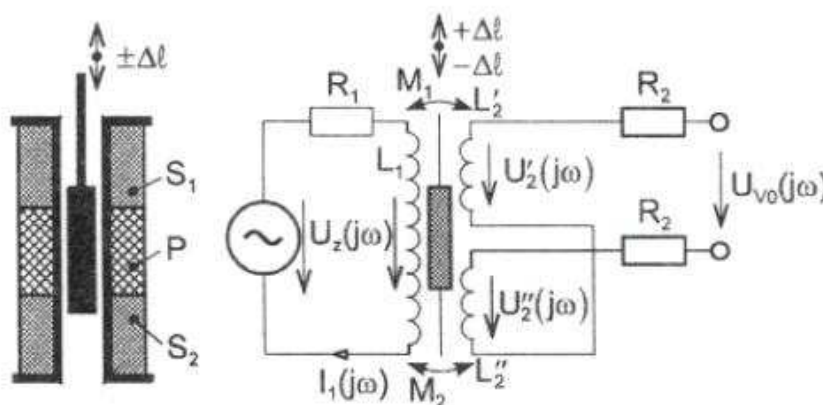
modulem. V tomto prostředí je napsána celá aplikace pro ovládání plošiny. Počítač s kontrolérem komunikuje po 100Mbitovém ethernetu. Aby bylo spojení co nejstabilnější, byl počítač PC vybaven pro tuto komunikaci samostatnou síťovou kartou Realtek RTL8139 a s kontrolérem propojen přímo překříženým kabelem. Blokové schéma zapojení celého systému je na obrázku 16.



**Obr. 16** Blokové zapojení počítačového jádra řídicího systému

### 3.1.2. Měření polohy pístnic

Jak už bylo uvedeno dříve, každý hydromotor obsahuje uvnitř duté pístnice integrovaný indukční snímač polohy. Jedná se o transformátorový typ, který se běžně označuje zkratkou LVDT (z anglického Linear Variable Differential Transformer). Snímač pracuje na principu změny vzájemné indukčnosti  $M$  mezi primární a sekundárními cívkami. Obdobně jako u transformátoru je primární cívka (nebo cívky) napájena z generátoru střídavého napětí. Změnu vzájemné indukčnosti  $M$  lze měřeným posuvem ovlivnit několika způsoby, nejčastější je otevřený magnetický obvod s posuvným jádrem. Výstupní napětí sekundární cívky je pak úměrné měřené veličině. Princip LVDT snímače je znázorněn na obrázku 17.



**Obr. 17** Princip LVDT snímače polohy

Výstupní napětí na sekundárních vinutích je určeno vztahy

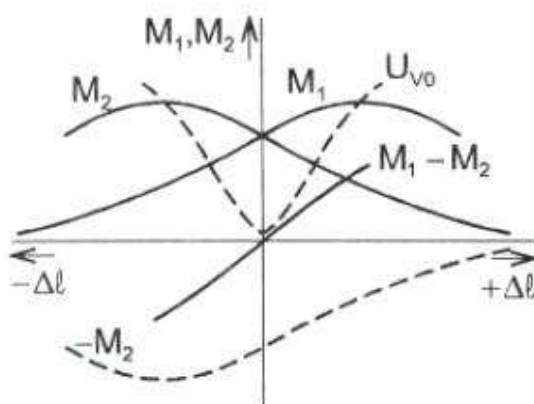
$$U'_2(j\omega) = j\omega M_1 I_1(j\omega) \quad (3.1.2-1)$$

$$U''_2(j\omega) = j\omega M_2 I_1(j\omega) \quad (3.1.2-2)$$

Sekundární vinutí jsou zapojena proti sobě, takže výstupní napětí senzoru naprázdno  $U_{v0}(j\omega)$  je dáno rozdílem obou dílčích napětí, takže platí

$$U_{v0}(j\omega) = j\omega(M_1 - M_2) \frac{U_z(j\omega)}{R_1 + j\omega L_1} = \frac{U_z(j\omega)}{R_1} * \frac{j\omega(M_1 - M_2)}{1 + j\omega\tau} \quad (3.1.2-3)$$

Časová konstanta primáru  $\tau = L_1/R_1$  může být pro  $j\omega L_1 \ll R_1$  velmi malá a výstupní napětí by tak bylo závislé i na kmitočtu. Proto se v praxi často používá napěťové napájení primáru (bez použití  $R_1$ ). Znázorníme-li skutečnou závislost  $U_{v0}$ , je zřejmé, že i pro přesně „nulovou“ polohu jádra je toto napětí nenulové a to i při velmi přísné symetrii vinutí. Důvodem jsou vyšší harmonické primárního proudu a také parazitní kapacitní vazba mezi vinutími. Vyloučení tohoto jevu, který zmenšuje rozlišení v okolí počátku musí zajistit vyhodnocovací obvod. Příklad průběhů jednotlivých veličin LVDT snímače je na obrázku 18.

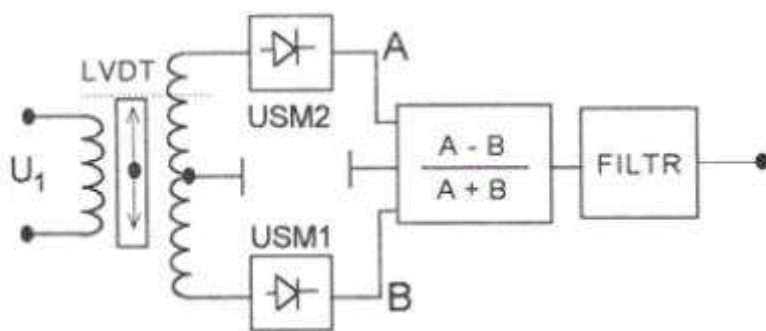


**Obr. 18 Průběhy veličin na LVDT snímači**

Pro vyhodnocení signálu z LVDT snímače lze použít několik typů obvodů. Prvním z nich je synchronní detektor, který vyloučí fázově posunuté složky  $U_{v0}$  vzniklé parazitní kapacitní vazbou. Tento obvod však vyžaduje dobrou stabilizaci amplitudy generátoru, kterým se napájí primární vinutí snímače a trpí i závislostí na eventuelních změnách fáze mezi měřeným signálem a referenčním napětím. Proto je lepší použít poměrový měřicí obvod. Zde se vychází z předpokladu, že při posuvu jádra se nemění transformační poměr  $(L'_2 + L''_2)/L_1$ . Pak se při změně napájecího napětí stejně změní i obě sekundární napětí a poměr

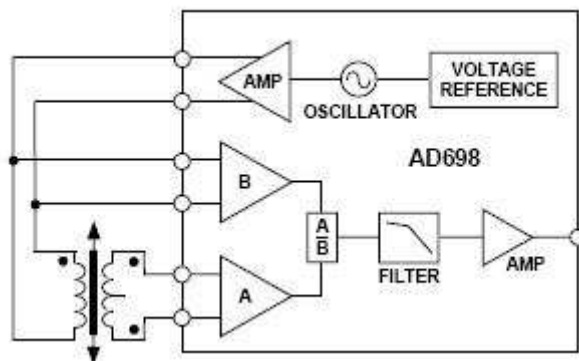
$$\frac{kU_2'(j\omega) - kU_2''(j\omega)}{kU_2'(j\omega) + kU_2''(j\omega)} \quad (3.1.2-4)$$

je nezávislý na kolísání amplitudy primárního napětí. Blokové schéma takového obvodu je na obrázku 19.



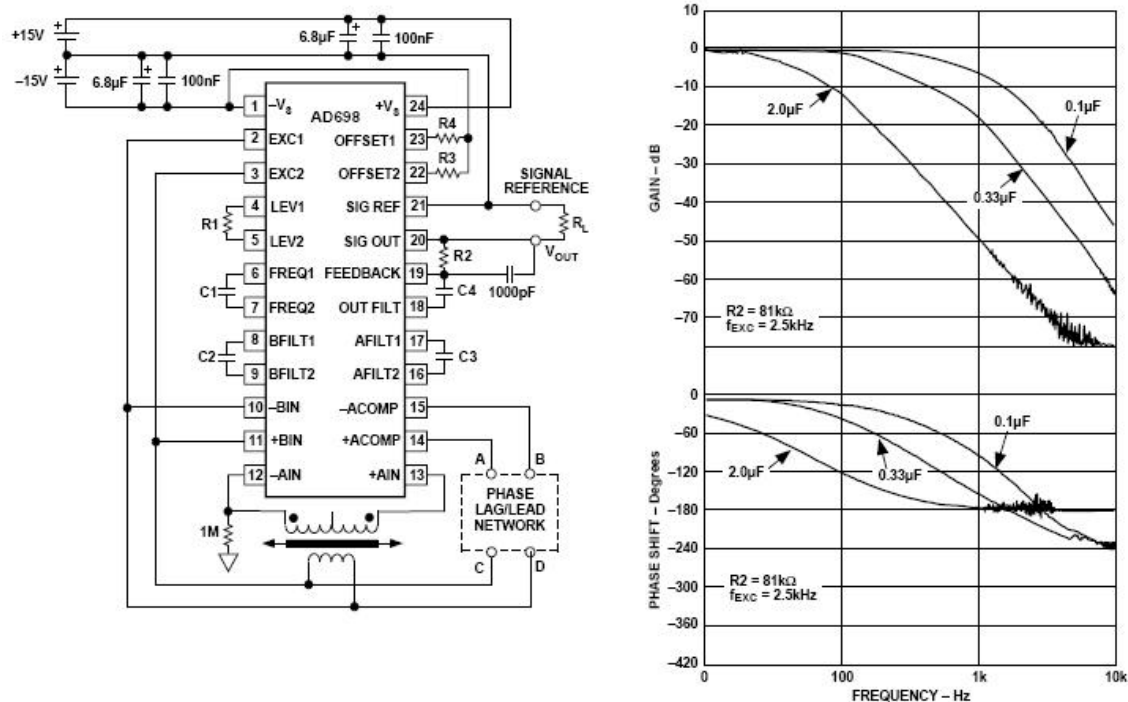
**Obr. 19 Princip poměrového vyhodnocovacího obvodu pro LVDT snímače**

Na principu poměrového obvodu jsou založeny současně vyráběné vyhodnocovací obvody. Jejich příkladem může být Universal LVDT signal conditioner AD 698 od firmy Analog Devices. Ten kromě poměrového detektoru obsahuje i generátor sinusového napětí pro buzení primárního vinutí. Jeho blokové schéma je na obrázku 20.



Obr. 20 Blokové schéma obvodu AD698

S minimem vnějších pasivních součástek, kterými se nastavuje frekvence a amplituda generátoru, hodnoty frekvencí filtrů a zesílení koncového stupně lze tak realizovat celý měřicí a napájecí obvod jedním integrovaným obvodem. Na hodnotách těchto součástek (např. kapacitách kondenzátorů filtrů) závisí i dynamické chování obvodu. To je pro typické hodnoty publikováno přímo v katalogovém listu [10]. Na obrázku 21 je typické zapojení obvodu AD 698 pro LVDT senzor a ukázka jeho frekvenční charakteristiky.



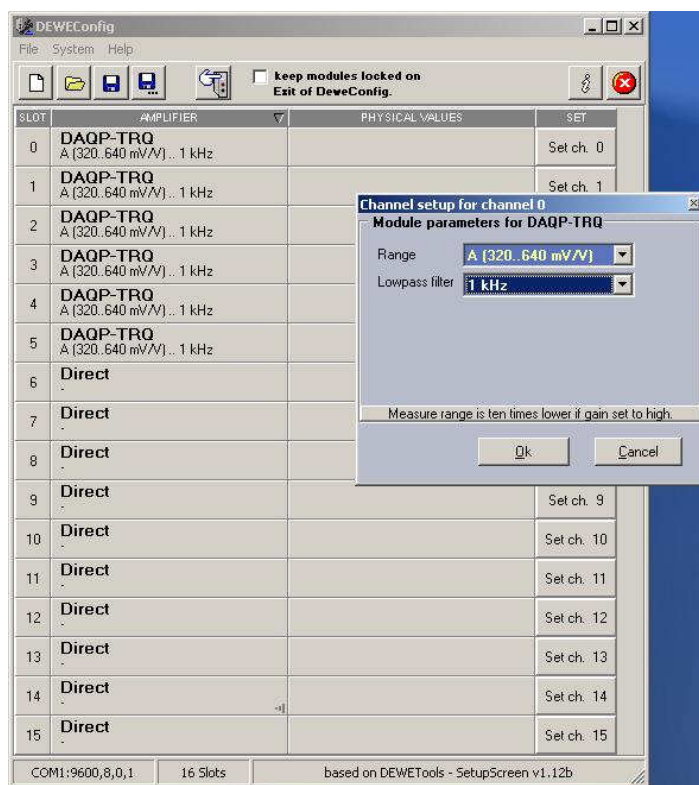
Obr. 21 Typické zapojení a charakteristiky obvodu AD 698

I když jsem s tímto obvodem realizoval vyhodnocovací obvod pro indukční snímače pro jinou aplikaci s velice dobrým výsledkem a funkcí, rozhodl jsem se u plošiny pro jiné řešení. Důvodem, který mě k tomu vedl, byla potřeba univerzálního vstupního zařízení, kde nebude problém s eventuálním rozšířením počtu vstupních kanálů pro konkrétní měřené aplikace na plošině. Protože vstupní karta disponuje 16ti vstupy, chtěl jsem nadimenzovat vstupní zařízení na stejný počet vstupů, ze kterých se zatím využije prvních šest pro měření polohy pístnic a zbytek zůstane v rezervě pro pozdější využití. Rozhodl jsem se proto použít prvky ze



sortimentu firmy Dewetron, což je další firma, jejíž komponenty se v laboratoři již používají. Tato firma se specializuje na přístroje a komponenty pro sběr dat a má proto v sortimentu celou škálu předzesilovačů pro všemožné typy snímačů. Mezi nimi pochopitelně nechybí ani modul pro indukční snímače polohy LVDT a budoucnu nebude problém s doplněním modulů pro další kanály. Předzesilovače jsou vyráběny ve formě kompaktních modulů, které se zasouvají buď přímo do měřicí ústředny nebo do samostatných van. Parametry modulu (zesílení, filtry,...) se nastavují tlačítky na čelní straně modulu nebo se programují pomocí softwaru dodávaného s modulem sériovou linkou RS232. Nastavené hodnoty zůstanou trvale zapsány v paměti modulu i po vypnutí napájení a pokud se parametry nemění stačí je nastavit jen jednou na počátku použití.

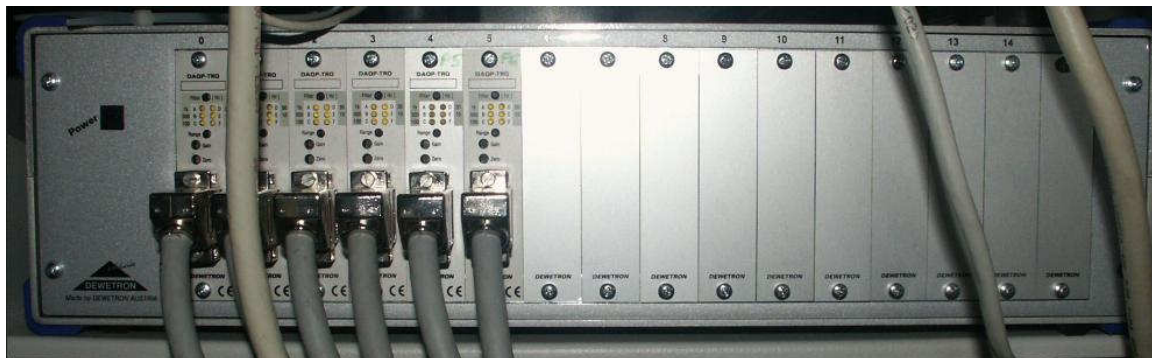
Pro plošinu jsem vybral DEWE-30-16, což je 16ti pozicová vana pro umístění modulů vybavená napájecím zdrojem. Výstupy modulů jsou vyvedeny na BNC konektory pro kontrolní měření a společný konektor pro propojení s měřicí kartou standardním stíněným kabelem. Dále je na vaně k dispozici konektor sériové linky pro programování parametrů modulů. Úplný popis zařízení je uveden v katalogovém listu [11]. Do této vany bylo osazeno zatím šest modulů DAQP-TRQ, což jsou moduly pro LVDT snímače polohy. Modul obsahuje generátor sinusového signálu 2V, 5kHz pro napájení primárního vinutí snímače, poměrový detektor, zesilovač a výstupní filtr typu dolní propust. V modulu lze naprogramovat velikost zesílení a frekvenci filtru. Úplný popis modulu je uveden v katalogovém listu [12]. Moduly mají pevně dané parametry napájecího napětí, měnit lze zesílení koncového stupně a kmitočet dolní propusti. Protože nastavování parametrů tlačítky není příliš pohodlné, využil jsem u plošiny možnost programování po sériové lince. Na obrázku 22 je panel softwaru DEWEConfig, pomocí kterého se dají parametry nastavit velmi pohodlně a přehledně.



**Obr. 22 DEWEConfig – software pro nastavování parametrů modulů**

Zesílení nejde nastavovat plynule, ale jen po skocích. Zde bylo tedy nastaveno tak, aby plná výchylka snímače  $\pm 100\text{mm}$  odpovídala přibližně napětí  $\pm 5\text{V}$  na výstupu modulu, což je jeden ze vstupních rozsahů následující A/D karty. Protože všechny snímače nemají úplně totožné provedení, výstupní napětí jednotlivých kanálů se pro stejnou mechanickou výchylku od sebe nepatrně liší. Tyto rozdíly jsou následně korigovány softwarově při měření. Ani frekvence

dolní propusti nejde volit plynule, ale jen v několika hodnotách (10, 100 a 1000Hz). Protože se u plošiny předpokládají provozní frekvence až do 16ti Hertzů, zvolil jsem pro jistotu frekvenci zlomu propusti až 1kHz. Tím se bezpečně odfiltruje 5kHz napájecí frekvence snímače a v žádném případě neovlivní měřený signál. Vana DEWE-30-16 osazená moduly DAQP-TRQ je na obrázku 23.

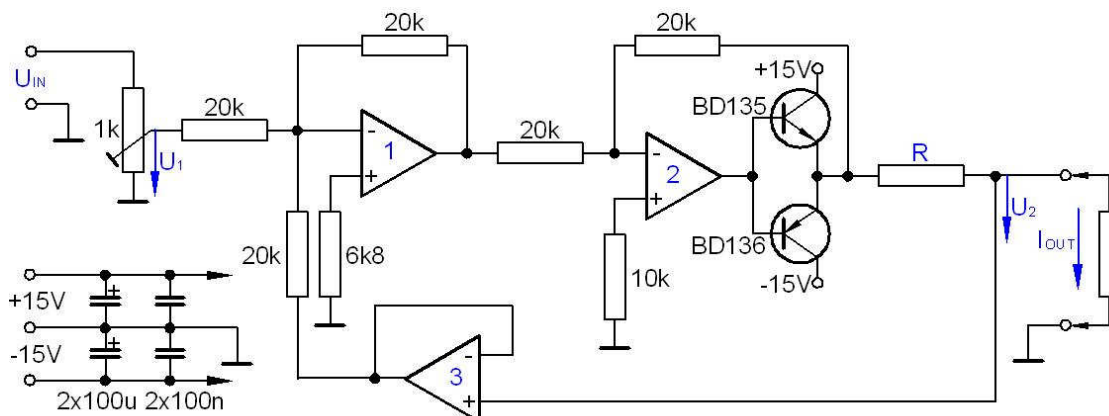


**Obr. 23 DEWE-30-16 s moduly DAQP-TRQ**

### **3.1.3. Řízení servoventilů**

Servoventil Rexroth 4WS2EM 10 má dvě ovládací cívky. Každá z nich se na plné výchylky šoupátka musí budit řídicím proudem  $\pm 30\text{mA}$  (viz kapitola 2.2.2 a 2.2.6). Cívky servoventilu lze zapojit buď sériově nebo paralelně. Paralelní zapojení je z provozního hlediska bezpečnější, protože eventuelní porucha (přerušení) jedné z cívek nezpůsobí výpadek celého servoventilu. Ten lze dále řídit pomocí druhé cívky, i když jeho dynamika pochopitelně bude menší. Nedojde ale k nějakým dramatickým skokovým změnám v rychlosti pohybu motoru, což by zcela určitě nastalo v případě totálního přerušení řízení u sériového řazení cívek. Z tohoto důvodu jsem zvolil paralelní zapojení cívek, čímž potřebný řídicí proud pro jeden servoventil dosahuje  $\pm 60\text{mA}$ . Použitá výstupní D/A karta má ovšem výstupy napěťové, ne proudové. V sortimentu National Instruments se vyskytuje pouze jedna karta s proudovými výstupy, jsou to ovšem výstupy standardu 4-20mA, takže pro řízení servoventilů je karta nepoužitelná. Proto jsem do systému PXI 1002 osadil klasickou kartu s analogovými napěťovými výstupy. Mezi výstupy karty a servoventily bylo tedy nutno vložit další obvod – napěťově-proudový převodník, který konvertuje napětí  $\pm 10\text{V}$  na proud  $\pm 60\text{mA}$ . Zde jsem se rozhodl pro vlastní stavbu osvědčeného obvodu, který jsem již v laboratoři několikrát použil. U některých starších servomotorů jsou totiž ještě jednostupňové servoventily s řídicím proudem  $\pm 1,5\text{A}$ . K jejich řízení se nedá použít přímo proudový výstup používaných regulátorů RED, který je dimenzován jen na miliampérové servoventily (max  $\pm 100\text{mA}$ ). RED má však paralelně vyveden i napěťový výstup a na něj jsem připojil napěťově-proudový převodník pro řízení jednostupňového servoventilu. Protože použité obvody pracují v laboratoři dlouhodobě bez poruch a k plné spokojenosti, nebyl důvod je nepoužít ani pro plošinu se šesti stupni volnosti. U obvodu bylo nutno jen změnit parametry některých součástek, aby výstupní proud byl ne 1,5A ale 60mA. Pro plošinu jsem postavil šest shodných obvodů na jedné desce plošných spojů. To se časem ukázalo jako ne příliš šťastné řešení z důvodů špatné opravitelnosti. Při experimentech se servoventily jednou došlo k nechtěnému rozpojení vodiče a napěťová špička indukovaná na cívce servoventilu zničila vstup operačního zesilovače v jednom převodníku. Následující výměna obvodu si ale vyžádala odpojení všech kabelů a vyjmutí desky. Proto uvažuji o změně na modulový systém, kdy kabely budou vedeny na svorkovnici základové desky a na ní bude v konektorech šest samostatných modulů převodníků. Eventuelní porucha některého z nich bude moci být vyřešena elegantně prostou výměnou celého modulu. Zatím však k další poruše nedošlo a vzhledem k nutným dalším pracím na ožívování plošiny jsem zatím k přestavbě nepřistoupil.

Zapojení napětově-proudového převodníku vychází ze schématu publikovaného v časopise Amatérské rádio [13] a je na obrázku 24.



**Obr. 24 Schéma napětově-proudového převodníku**

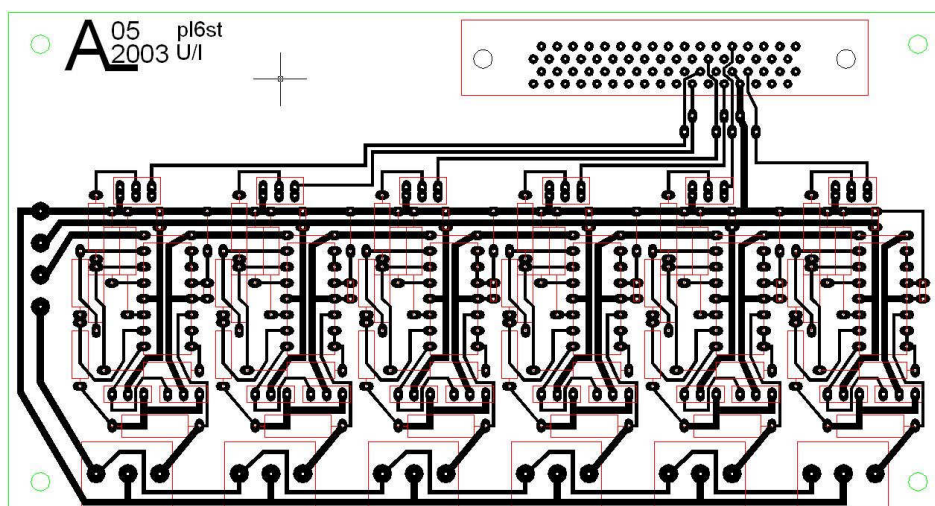
Jde o poměrně jednoduché zapojení se třemi operačními zesilovači. Pro přenos zapojení platí jednoduchý vztah

$$I_{OUT} = \frac{(U_1 + U_2) - U_2}{R} \quad (3.1.3-1)$$

tedy po úpravě 
$$I_{OUT} = \frac{U_1}{R} \quad (3.1.2-2)$$

z čehož vyplývá, že přenos celého obvodu je dán hodnotou jediného odporu R.

Výstupní napětí z D/A karty se uvažuje v rozsahu  $\pm 5V$ , takže dle vzorce 3.1.2-2 by pro požadovaný proudový rozsah  $\pm 60mA$  vycházel rezistor  $R=83,33\Omega$ . Ten je při plném výstupním proudu zatížen ztrátovým výkonem přibližně  $0,3W$ . Z tohoto důvodu je nemožné nahradit tento rezistor trimrem, který by dovolil nastavit přesně požadovanou hodnotu odporu. Proto jsem do zapojení použil rezistor s menší hodnotou  $68\Omega$  a výkonem  $1W$ . Aby se výstupní proud udržel v požadované hodnotě, doplnil jsem původní zapojení o trimr na vstupu. Tím lze nastavit pro vstupních  $\pm 5V$  přesně  $\pm 60mA$  výstupních. Praktické zapojení využívá čtveřici OZ v jednom pouzdru – klasiku LM 324. Výstup je posílen dvojicí komplementárních tranzistorů BD 135 a 136, které jsou pro proud  $\pm 60mA$  poněkud předimenzovány. Důvodem je opět ztrátový výkon, který tyto tranzistory dokáží vyžárit bez nutnosti montáže na chladič. Jak už jsem uvedl dříve, navrhl jsem pro všech šest převodníků jedinou desku tištěného spoje. Její provedení je vidět na obrázku č.25.



**Obr. 25 Návrh desky tištěných spojů proudově-napětových převodníků**



Skutečné provedení již osazené a zapojené desky převodníků je na obrázku 26. Na horní straně jsou vidět kabely k jednotlivým servoventilům, na spodní straně je konektor pro propojení s D/A kartou v PXI standardně dodávaným kabelem.

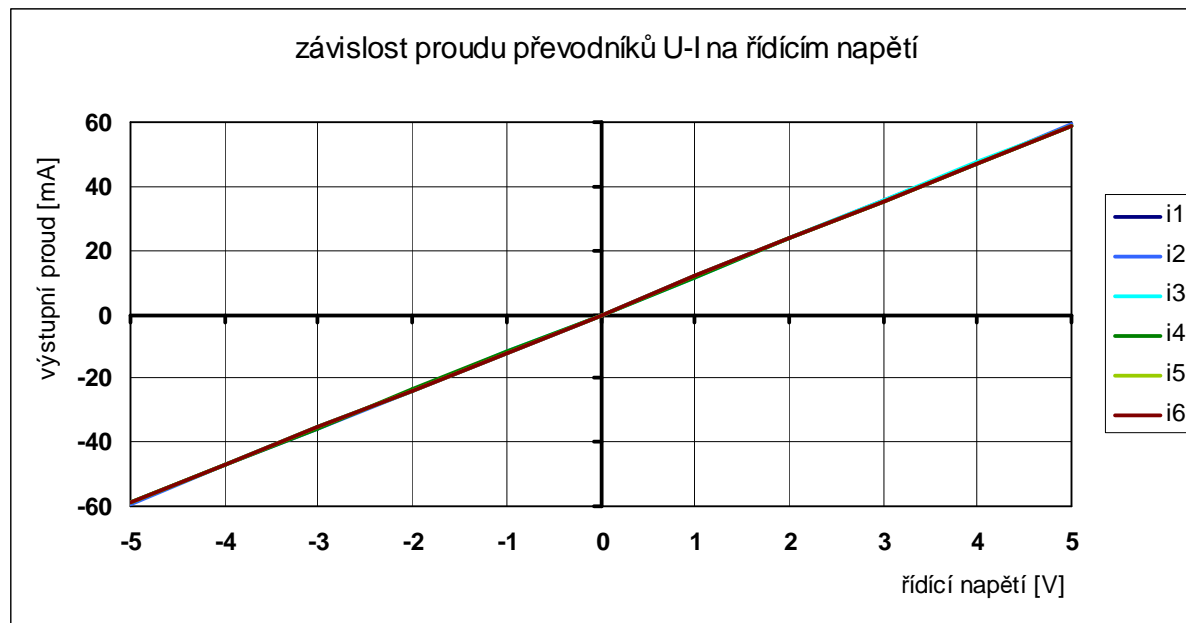


**Obr. 26 Skutečné provedení desky napěťově-proudových převodníků**

U převodníků byly pochopitelně před nasazením do „ostrého“ provozu proměřeny jejich parametry. Prvním měřením jsem ověřoval statické převodní charakteristiky. Na vstupy bylo postupně přiváděno zvyšující se napětí a měřen ustálený výstupní proud. Hodnota napětí byla generována přímo výstupní kartou v systému PXI, proud byl měřen přístrojem Fluke 185 True RMS Multimeter zapojeným sériově do obvodu cívek servoventilů. Výsledky měření jsou v následující tabulce.

závislost proudu převodníků U-I [mA] na řídicím napětí [V]						
U	i1	i2	i3	i4	i5	i6
-5	-59,00	-59,20	-59,00	-59,10	-59,10	-59,00
-4	-47,28	-47,21	-47,22	-47,29	-47,25	-47,26
-3	-35,43	-35,49	-35,45	-35,49	-35,45	-35,41
-2	-23,65	-23,78	-23,75	-23,62	-23,74	-23,75
-1	-11,85	-11,86	-11,82	-11,80	-11,87	-11,85
0	-0,10	-0,05	-0,07	-0,04	-0,10	-0,08
1	11,88	11,84	11,81	11,80	11,89	11,85
2	23,71	23,73	23,69	23,65	23,69	23,68
3	35,45	35,50	35,48	35,43	35,46	35,40
4	47,28	47,29	47,31	47,21	47,21	47,22
5	58,90	59,15	59,10	59,00	58,99	59,08

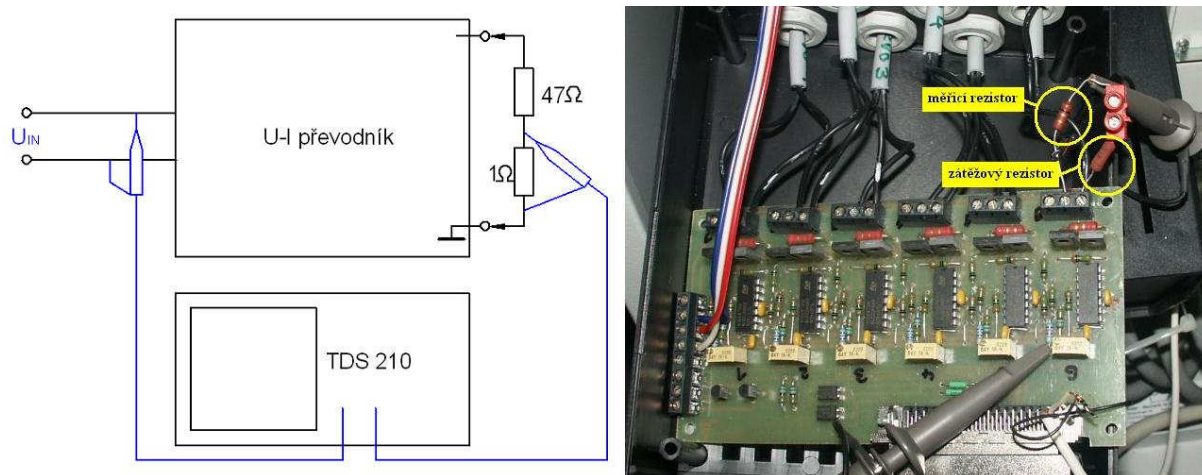
Lepší představu o průbězích však dává grafické znázornění, proto je na obrázku 27 grafické znázornění hodnot z tabulky.



**Obr. 27 Naměřené charakteristiky převodníků**

Z průběhů je vidět prakticky shodný průběh u všech šesti převodníků a zároveň slušná linearita.

Druhým prováděným měřením bylo ověření dynamického chování obvodu. Zde jsem zvolil změření odezvy na jednotkový skok vstupního napětí. Skok byl opět generován přímo výstupní kartou D/A převodníků v PXI, k záznamu průběhů sloužil paměťový osciloskop Tektronix TDS 210. Nejprve jsem měřil chování samotného obvodu bez připojeného servoventilu. Jako zátěž byl připojen rezistor s hodnotou  $47\Omega$ , což je přibližná ohmická hodnota odporu cívek servoventilu. Do série s tímto odporem byl zapojen měřicí rezistor  $1\Omega$ , na kterém bylo snímáno napětí úměrné procházejícímu proudu. Tento postup byl zvolen proto, že k osciloskopu nemám k dispozici proudovou sondu. Schéma měření a skutečné provedení je znázorněno na obrázku 28.

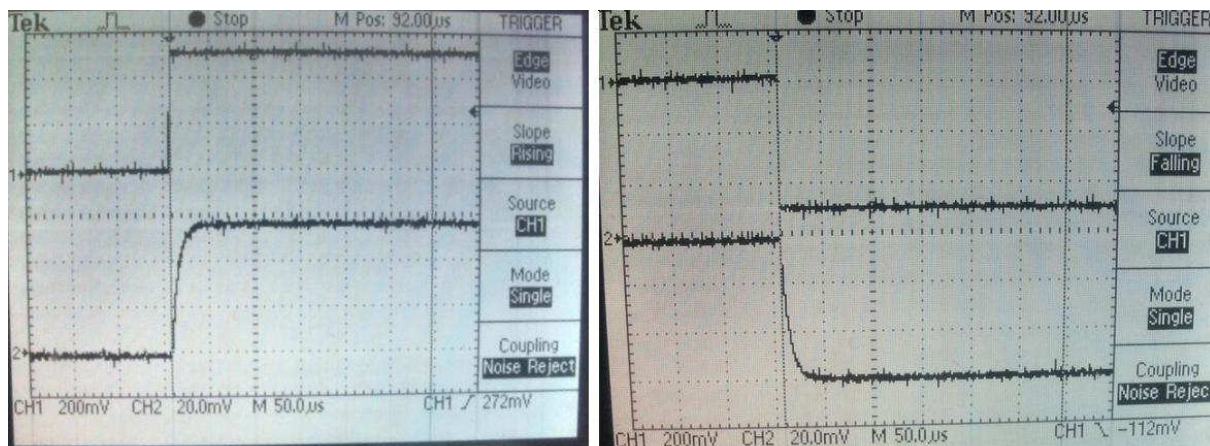


**Obr. 28 Zapojení obvodu při měření odezvy na jednotkový skok**

Měření bylo postupně provedeno pro skok kladné i záporné polarity. Měření na osciloskopu bylo trigrováno hranou vstupního obdélníkového skoku. Osciloskop TDS 210 je již poněkud staršího data a bohužel ještě není vybaven modulem pro přenos naměřených dat do PC. Proto je na následujícím obrázku 29 zobrazen záznam průběhu odezvy pouze jako fotografie displaye osciloskopu. Kvalita obrázku je tím pochopitelně snížena, na druhé straně je vše potřebné z obrázku snadno rozpoznatelné. Měření bylo pochopitelně provedeno pro všech šest

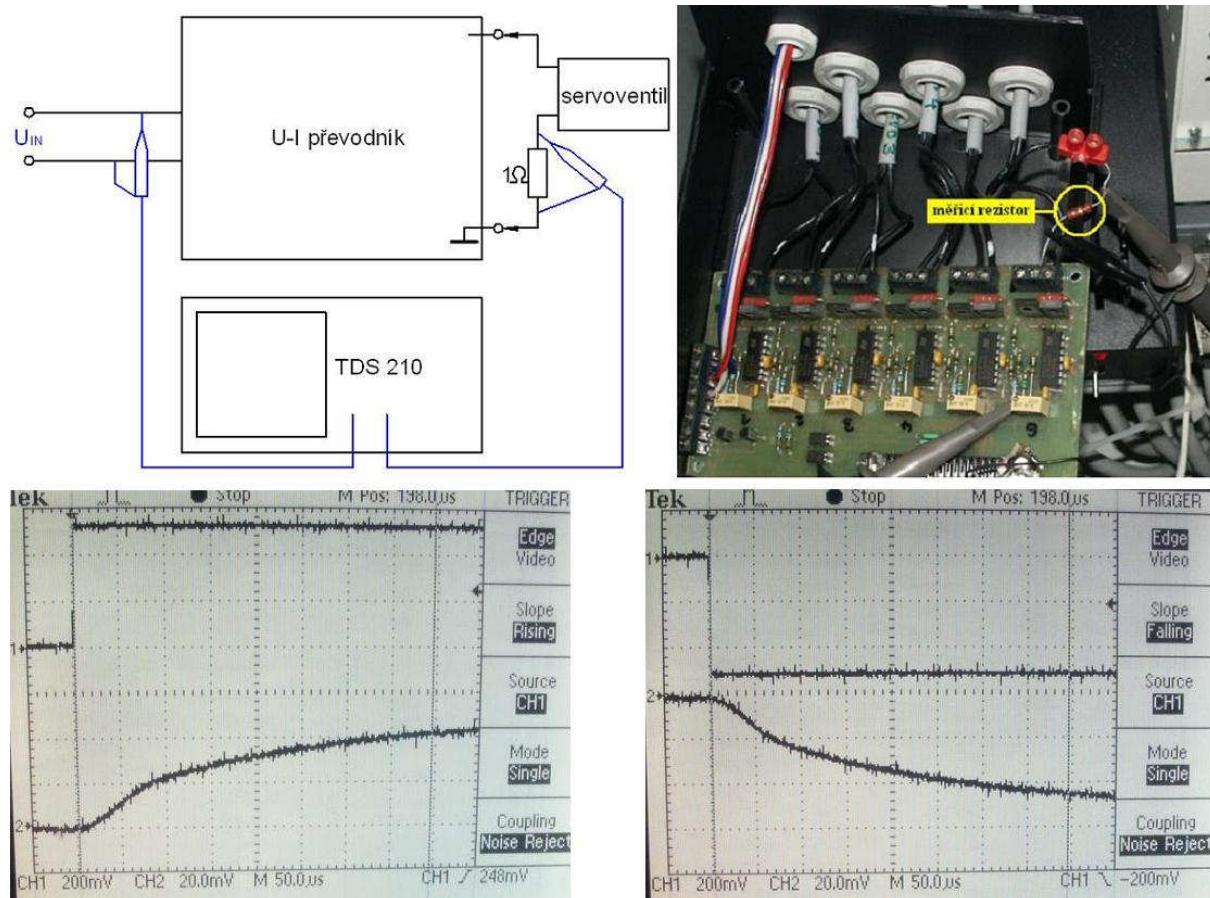


obvodů a protože stejně jako u minulého měření vykazovaly všechny obvody prakticky shodné průběhy, je výsledek prezentován jen u jednoho z převodníků.



Obr. 29 Odezva U-I převodníku na jednotkový skok

Horní kanál č.1 zobrazuje vstupní skok, dolní kanál č.2 průběh napětí na měřicím rezistoru  $1\Omega$ , který odpovídá výstupnímu proudu. Z průběhů je patrné velmi „mravné“ chování obvodu, přechodová charakteristika bez překmitů, časová konstanta odhadnuta na cca  $20\mu s$ . Vzhledem k časovým konstantám servoventilu v řádu jednotek milisekund (viz kapitola 2.2.2) je obvod přibližně 100krát rychlejší, takže naprosto vyhovující. Výsledné chování celého hydraulického servomechanismu tento obvod ovlivňovat prakticky nebude. Druhé měření bylo provedeno se skutečným servoventilem. Měřicí obvod zůstal prakticky shodný, jen místo zátěžového rezistoru byl připojen servoventil. Princip tohoto zapojení, reálné provedení a výsledné charakteristiky jsou na obrázku 30.



Obr. 30 Měření přechodové charakteristiky s reálným servoventilem

Při měření bylo záměrně ponecháno shodné nastavení časové základny, aby byly průběhy snadno porovnatelné. Charakteristika je nyní pochopitelně ovlivněna připojeným servoventilem. Indukčnost jeho cívek prodloužila časovou konstantu několikanásobně, tvar charakteristiky však zůstal zachován. Ani při zapojení s reálným servoventilem tedy nedochází k žádným nežádoucím průběhům, obvod napětově-proudového převodníku pracuje spolehlivě i s indukční zátěží.

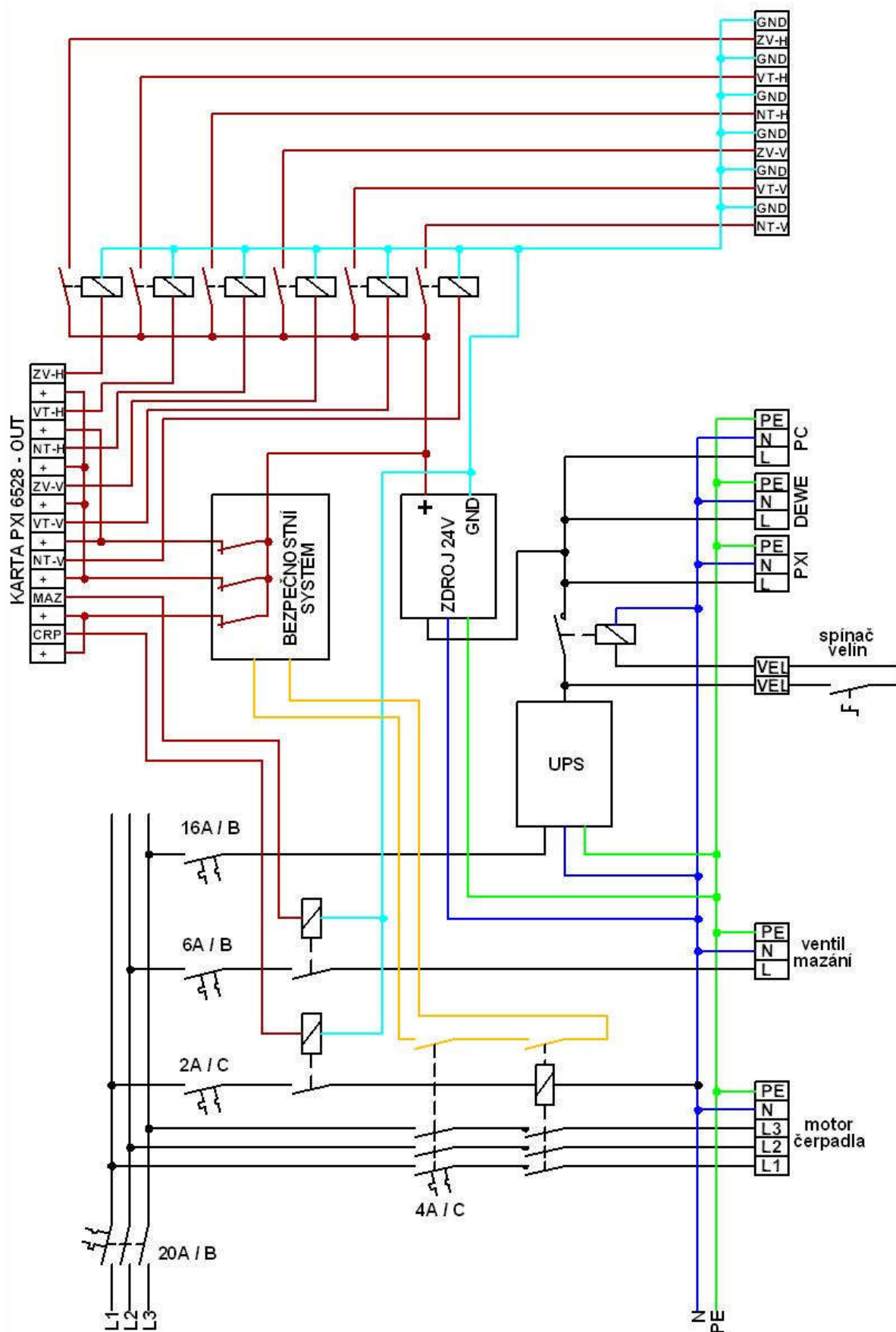
Obvody napětově-proudových převodníků vyžadují symetrické napájení  $\pm 15\text{V}$ . Uvažujeme-li maximálně 60mA na jeden servoventil, je to při šesti obvodech 360mA. K tomu je nutné připočítat nějaký odběr vlastních operačních zesilovačů, takže reálně by stačilo počítat s výkonem přibližně 7W pro každou větev. Pro realizaci zdroje jsem sáhl opět po již osvědčeném a několikrát v praxi ověřeném řešení. Je jím hermeticky zalitý spínaný zdroj od MTM Power. Zdroje tohoto výrobce se vyznačují kompaktním provedením, pevnou spínací frekvencí 90kHz a pracují i s nulovým odběrem na výstupu. Pro realizaci napájení pro měřicí a regulační aplikace se mi jeví jako velmi vhodné. Zdroje se vyrábí v odstupňované řadě výstupních napětí a výkonů. Já jsem nakonec vybral typ PCMA 30 D15. „D15“ znamená 2x 15V a „30“ celkový výkon 30W. Na jednu větev tedy připadá 15W, což je více, než je potřeba pro napětově proudové převodníky. Při této volbě jsem však už počítal s tím, že se tento zdroj využije i pro napájení některých obvodů v bezpečnostním systému a proto jsem volil rezervu ve výkonu. Cenový rozdíl oproti 15ti wattové variantě je totiž zanedbatelný. Úplné parametry zdroje jsou v katalogovém listu [14], příklad provedení zdroje (s jinou skladbou výstupních napětí) je na obrázku 31.



**Obr. 31** Příklad provedení zdroje PCMA

#### **3.1.4. Výkonové obvody**

Při návrhu ovládacího systému plošiny jsem musel částečně zabrousit i do „silnoproudé“ oblasti, i když to v mém případě představuje maximálně klasické třífázové 3x400V. Všechny systémy je totiž třeba nějak napájet, napájení zajistit proti výpadkům, dále zapínat motor vývěvy a ventil mazání. V neposlední řadě je třeba postarat se o 24V napájení pro ventily v napaječích a zajistit jejich spínání. Při prvotních oživovacích pokusech vznikala tato část živelně postupným přidáváním dalších a dalších potřebných obvodů, takže výsledkem byla změř vzájemně pospojovaných „krabic“ bez nějaké koncepce. V okamžiku, kdy bylo rozhodnuto o použití plošiny pro testy s člověkem, bylo jasné, že se tato část bude muset kompletně přestavět. Rozhodl jsem se proto pro jednu skříň, která soustředí všechny obvody do jednoho místa a zajistí centrální napájení všech systémů. Do této skříně byla nakonec umístěna i reléová logika bezpečnostního systému, protože jak bude popsáno v kapitole o tomto systému, bezpečnostní systém vlastně „prorůstá“ přímo do spínacích obvodů, aby mohl v okamžiku poruchy přebrat vládu nad plošinou. V této kapitole však nebude zatím o bezpečnostním systému hovořeno, ve schématu zapojení silnoproudé části je uveden jako „černá skříňka“. Zapojení je uvedeno na obrázku 32.



Obr. 32 Schéma zapojení výkonových obvodů



Celá plošina má centrální přívod elektrické energie (standardní třífázová síť), který je jištěn hlavním jističem. Za ním následují jističe jednotlivých sekcí – motoru čerpadla odsávání, stykače motoru, ventilu mazání a elektroniky. Motor je spínán stykačem s cívkou na síťové napětí. Pro bezpečný provoz plošiny pro zkoušky s člověkem je potřeba zajistit funkčnost řídicí části i při výpadku elektrické energie. Měřením jsem zjistil, že příkon celé elektronické části při sepnutí všech ventilů nepřesahuje 500VA. Proto jsem se rozhodl použít klasickou UPS, která se používá například k osobním počítačům. Je nejsnáze dosažitelná, spolehlivá, se zajištěným servisem na výměnu baterií po uplynutí jejich životnosti. Konkrétně jsem použil typ APC Back UPS RS 1500. Přes tuto UPS se tedy napájí systém PXI, rám se zesilovači DEWERACK i operátorské PC. Aby se nemusely jednotlivé přístroje zapínat samostatně, je jejich napájení spínáno stykačem, který je ovládán spínačem ve velíně.

Cívky elektromagnetických ventilů napaječů jsou na 24V. Pro jejich provoz je tedy nezbytný zdroj stejnosměrného napětí 24V. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl, že i všechny další reléové systémy budou napájeny tímto napětím, aby pro všechny obvody stačil jediný zdroj. Každá cívka ventilu v napaječi odebírá přibližně 1,2A. Pokud jsou tedy sepnuty všech šest ventilů, je jejich odběr přibližně 7,2A. Cívka jednoho standardního relé se dvěma přepínacími kontakty má odběr menší než 100mA (cca 60mA). Z této jednoduché úvahy jsem vycházel při volbě zdroje. Například pro zdroj schopný dodat 10A, byla by rezerva pro relé necelé tři ampéry, což představuje asi 30 relé. To mi připadalo dostatečné, proto jsem hledal zdroj s přibližně tímto výkonem. Volba padla opět na osvědčeného výrobce COSEL, jehož spínané zdroje jsem již v laboratoři také několikrát použil. Ten pro výstup 24V nabízí výkonovou řadu od pěti až do 1680W v několika typových řadách. Typy zdrojů se liší různým provedením krytů a chlazení, od nezakrytovaných modelů vhodných pro další vestavbu až po kompletní „krabice“. Pro účel plošiny nejlépe vyhovuje typové provedení PBA, což je kompletní zdroj s krytem, aktivním chlazením a robustní svorkovnicí pro připojení kabeláže. Výkonově je okolo potřebného výkonu v nabídce buď 150W (tj. cca 6,5A) nebo pak 330W (14A). 150W je málo, takže jsem volil 330ti wattovou variantu – zdroj PBA 300F. Ten je výkonově sice trochu výš než by bylo potřeba, ale rezerva ve výkonu není na škodu, zdroj nepracuje na maximum, takže nemusí být obava například z přehřátí. Kompletní parametry zdroje jsou uvedeny v katalogovém listu [15] a jeho provedení je vidět na obrázku 33.

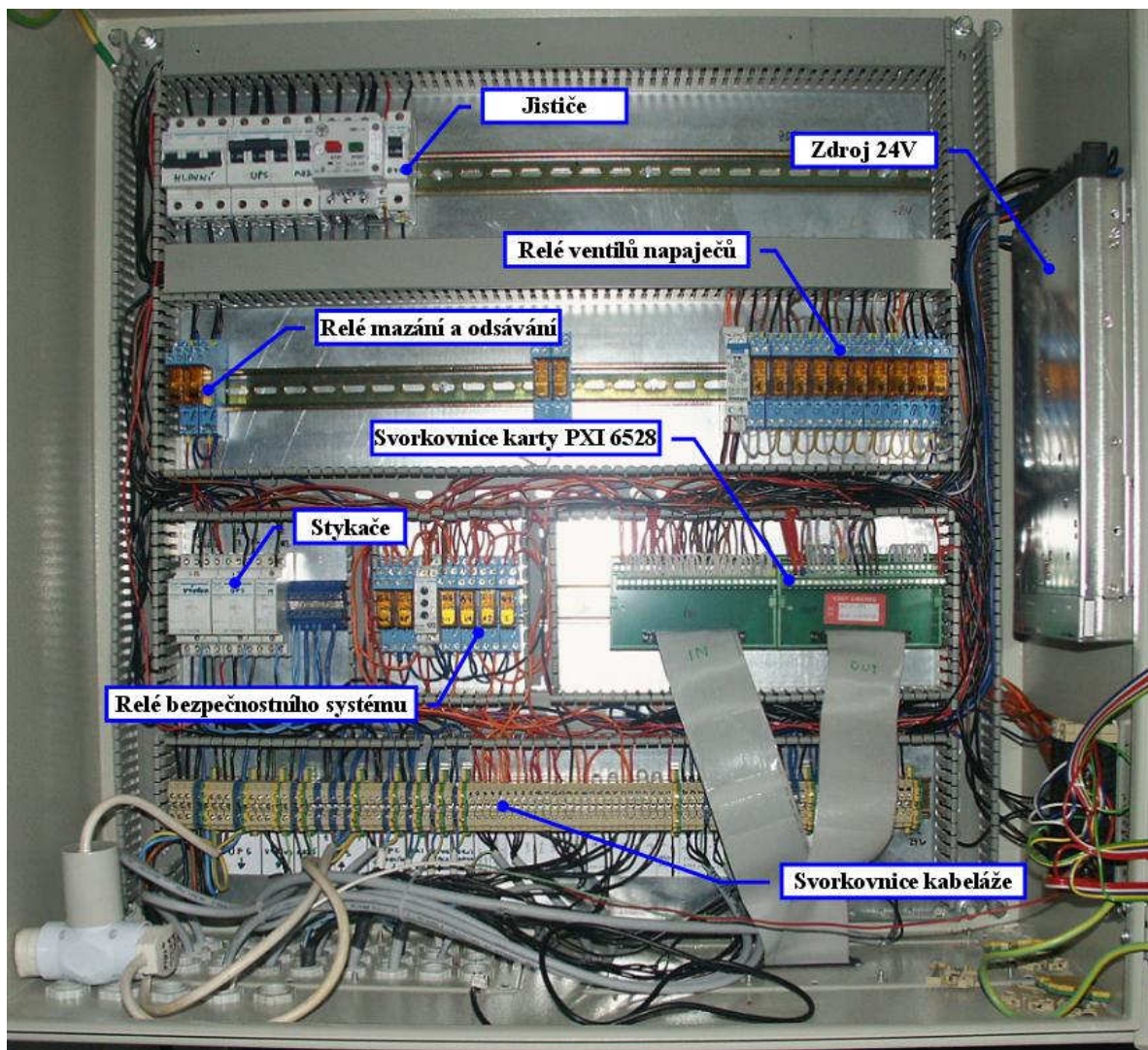


**Obr. 33 Spínaný zdroj COSEL PBA 300F**

Zdroj 24V je opět zapojen za UPS. Jeho výstupní napětí vede přes šest relé na svorkovnici, kam jsou připojeny kabely od ventilů v napaječích. Relé jsou spínána přímo výstupy z karty PXI 6528 (výstup karty je realizován spínacím kontaktem miniaturního relé přímo na kartě). Obdobným způsobem je ovládáno i relé mazání a relé spínající cívku stykače motoru. Napájení 24V je vedeno na kontakty karty PXI 6528 přes bezpečnostní systém, který si tak přerušením tohoto napájení vyhrazuje právo odpojit všechny ventily v napaječích, mazání i motor čerpadla nezávisle na stavu výstupů karty a v havarijních situacích tak odpojit plošinu

od zdroje hydraulické energie. Činnost bezpečnostního systému bude vysvětlena podrobně v kapitole 4.

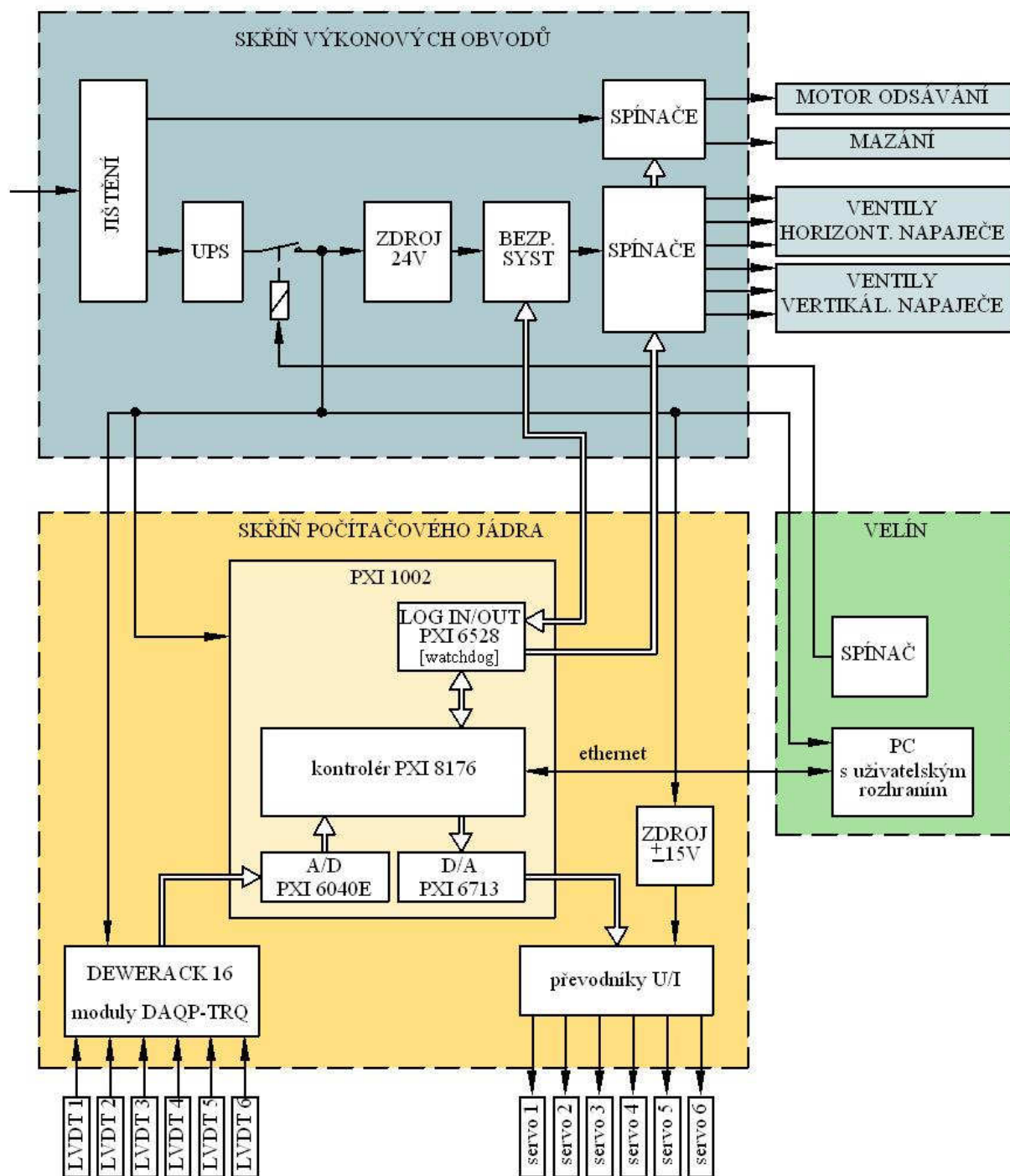
Všechny obvody výkonové části jsou soustředěny v jedné skříni, konkrétní provedení je vidět na obrázku 34. Na obrázku chybí UPS, která je umístěna v přední části skříně a zakrývala by tak podstatnou část prvků. Proto byla před pořízením této fotografie vyjmuta.



Obr. 34 Skříň výkonových obvodů

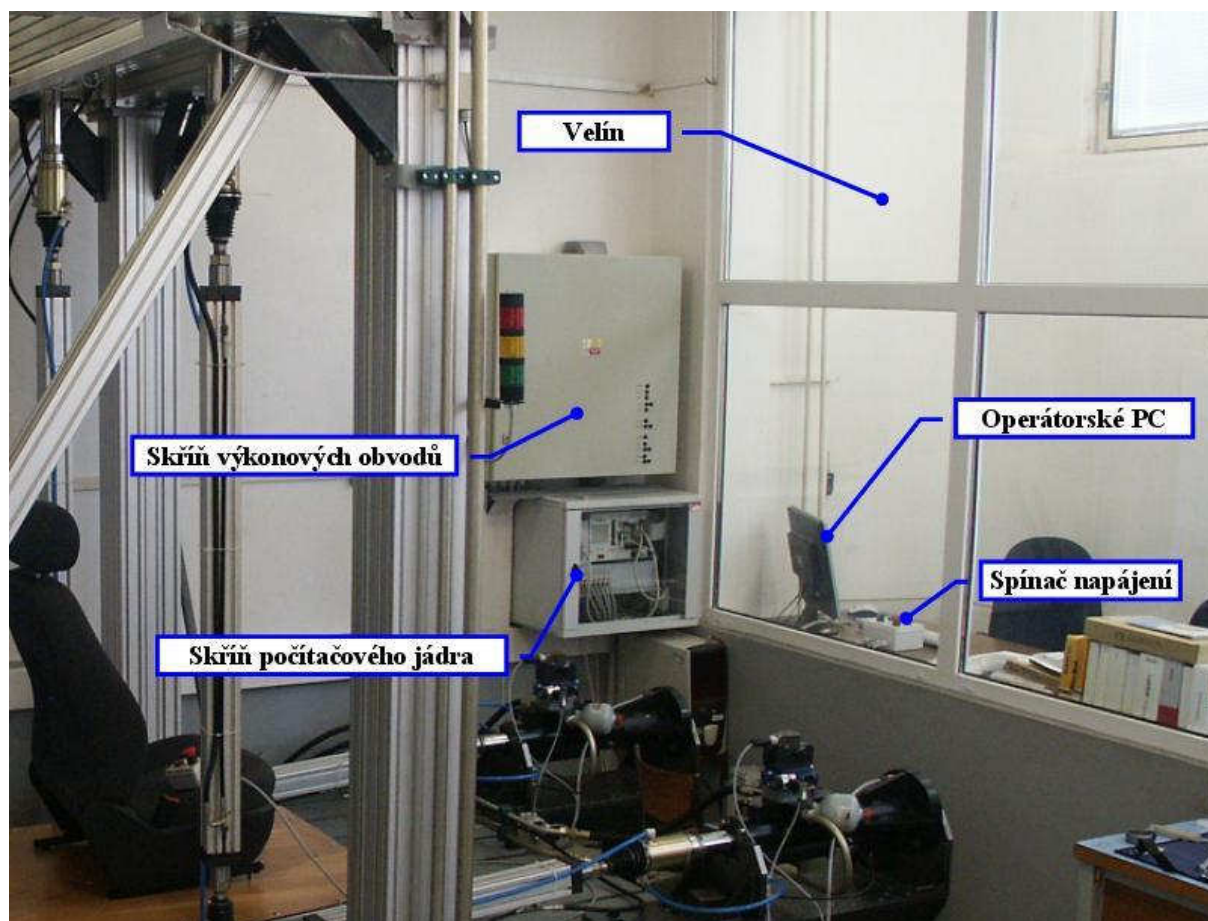
### 3.1.5. Zapojení řídicího systému - závěrečné shrnutí

V předchozích kapitolách bylo rozebráno zapojení jednotlivých komponent, které společně tvoří řídicí systém plošiny. Jejich vzájemné propojení je uvedeno v blokovém schématu celého řídicího systému. To vychází ze zapojení počítačového jádra na obrázku č.16 a je doplněno o všechny navazující obvody. Celkové blokové schéma řídicího systému plošiny je na obrázku 35. Mechanicky je řídicí systém umístěn ve dvou skříních. Jedna je výše popisovaná skříň výkonových obvodů, všechny ostatní prvky jsou umístěny v druhé menší skříni počítačového jádra. Operátorské PC je spolu se spínačem napájení umístěno samostatně ve velínu. Toto uspořádání je vidět na obrázku 36.



Obr. 35 Blokové schéma řídicího systému plošiny





**Obr. 36 Celkové uspořádání řídicího systému plošiny**

Z celkového uspořádání je vidět výsledná ucelenost řešení ovládacího systému. Všechny systémy jsou umístěny přehledně ve dvou skříních v těsném sousedství s velínem, čímž se zjednodušila i propojovací kabeláž. Z důvodu bezpečnosti jsem použil sadu speciálních olejuvzdorných a nehořlavých kabelů od německé firmy Lapp kabel. Jejich provedení je různé podle účelu – od stíněných pro připojení snímačů až po silové např. pro motor vývěvy. Všechny kabely jsou uloženy v plastových lištách.

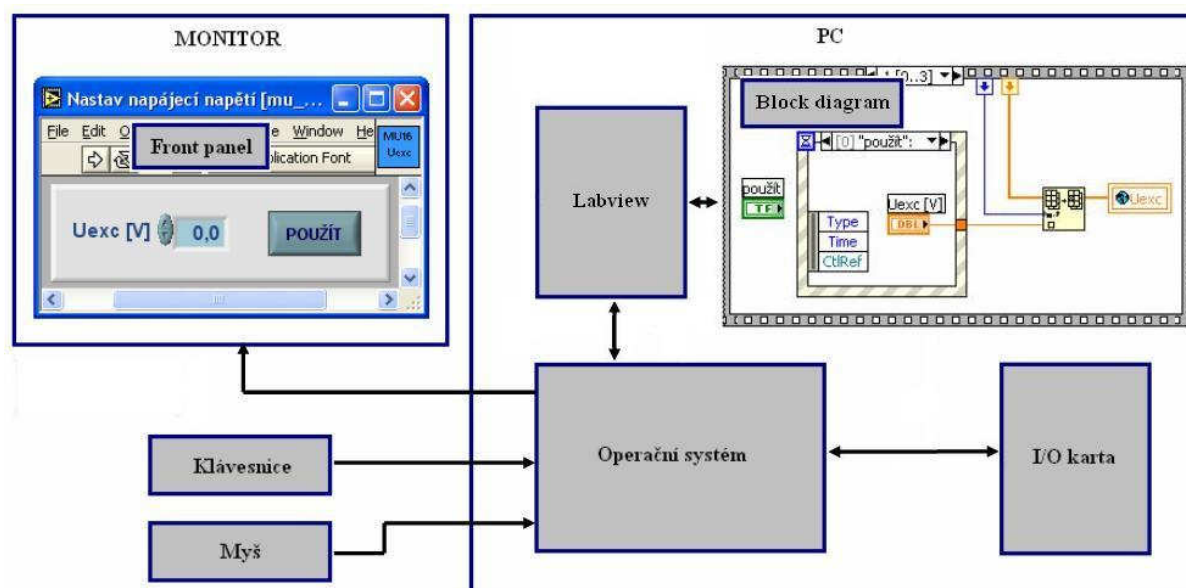
Závěrem této kapitoly lze konstatovat, že navržený řídicí systém je spolehlivě funkční a plní zatím bez poruch funkci, ke které byl postaven. Z toho plyne správnost návrhu i vhodné nadimenzování jednotlivých komponent (jak výkonové, tak i výpočetní kapacity).

Dále bych chtěl poznamenat, že součástí méj práce nebylo jen navrhnout komponenty systému a jejich vzájemné propojení, ale nedílnou součástí byla i praktická realizace výše popsaného systému. To představovalo například výrobu a osazení desek tištěných spojů, zapojení celé skříně výkonových obvodů i položení a zapojení veškeré kabeláže.

## 3.2. SOFTWAREVÉ VYBAVENÍ

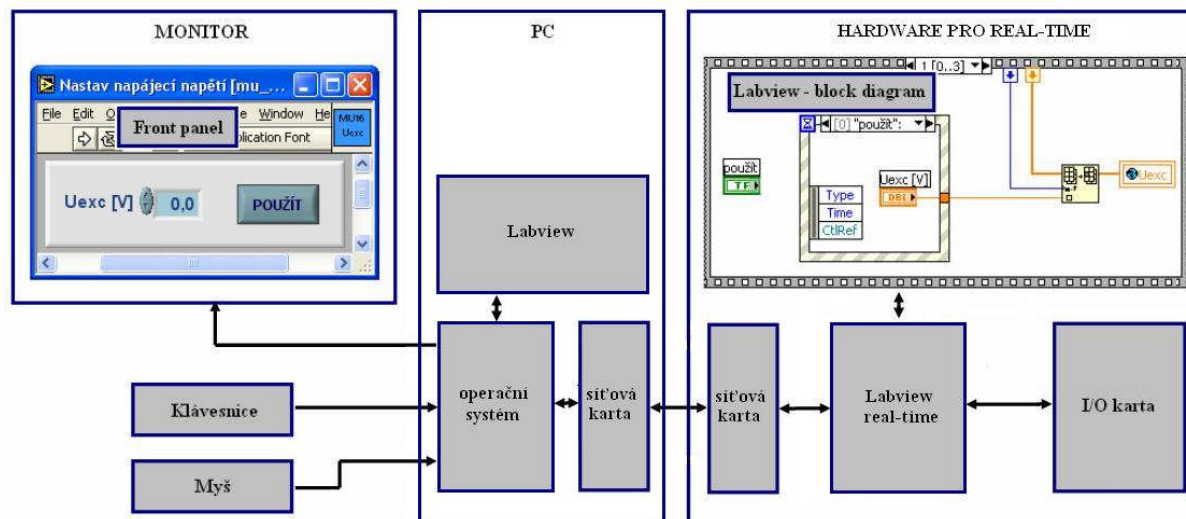
### 3.2.1. Labview a real-time

Aplikace napsaná v prostředí Labview se skládá ze dvou částí. První je „Front panel“, což je okno, které vidí uživatel na monitoru a pomocí prvků na něm umístěných komunikuje s aplikací. Druhou částí je „Block diagram“. V něm je vytvořena celá programová struktura aplikace. Pokud běží Labview na standardním PC, využívá pro zobrazení Front panelu a ovládání jeho prvků služeb operačního systému. Zprostředkovatelem kontaktu mezi uživatelem a aplikací je tedy operační systém PC, který zajistí obsluhu klávesnice, myši, grafické karty, tiskárny apod. Pomocí nainstalovaných ovladačů pak operační systém zprostředkovává i styk se speciálním hardwarem (např. kartou s analogovými a logickými vstupy a výstupy). Znázornění činnosti aplikace v Labview na běžném PC je na obrázku 37.



Obr. 37 Znázornění běhu aplikace v Labview na standardním PC

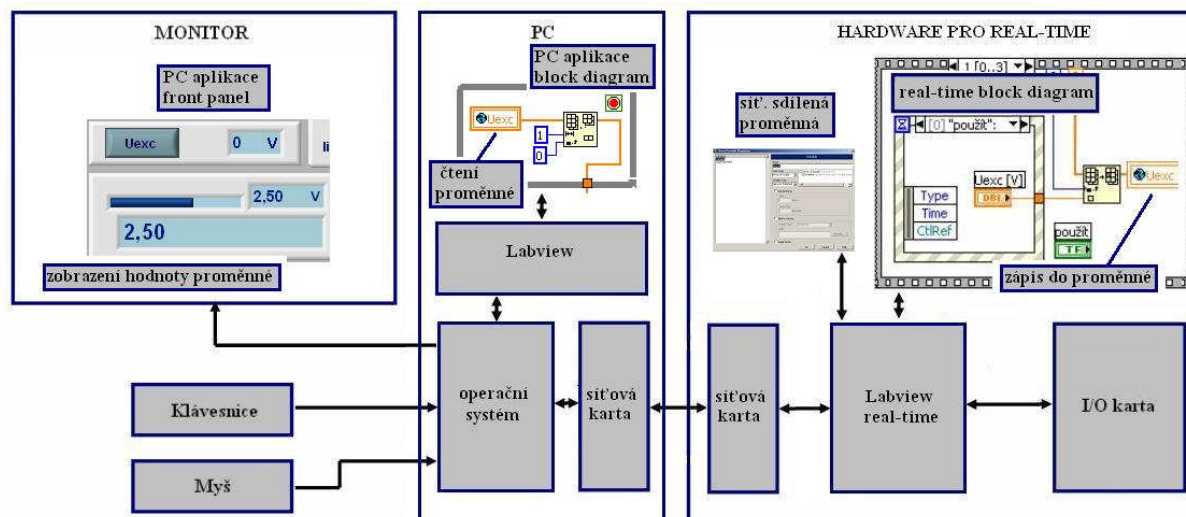
Běh aplikace na standardním PC je tedy zcela závislý na použitém operačním systému. Z tohoto důvodu tuto konfiguraci nelze použít pro aplikace, u kterých je potřeba přesné časování běhu – například právě regulační smyčky. Pro tyto účely je třeba použít speciální hardware, na kterém pak není instalován klasický operační systém, ale real-time operační systém Labview. Takových systémů v současné době nabízí National Instruments celou škálu. Mezi nimi jsou i systémy PXI, jejichž zástupce jsem použil u plošiny. Operační systém reálného času umožňuje běh aplikace v přesné časové synchronizaci, pro řízení běhu lze použít hardwarový časovač, který je součástí systému. Real-time systém dále umí opět pomocí standardně nainstalovaných ovladačů obsluhovat všechny vstupně-výstupní karty z produkce National Instruments. Co bohužel neumí, je obsluha „komunikačních“ prostředků s operátorem, tedy obsluhu monitoru, klávesnice, myši. Tak může pracovat např. jednoduchý regulátor čehosi, který plní svojí úlohu a s okolním světem komunikuje jen pomocí vstupně-výstupních karet. Ovládání se tedy omezuje např. na tlačítka a LED diody připojené k logickým vstupům karty. Pro složitější aplikace je nutno pro komunikaci s operátorem použít další počítač, už klasické PC, které s real-time systémem komunikuje standardním protokolem TCP/IP po ethernetu. Ethernetová karta je totiž dalším z prostředků, které real-time systém „umí“. Tato cesta se používá i pro vlastní zavedení aplikačního programu do real-time systému. Protože vzdálenost ethernetového spojení není nijak omezena, lze takto například kontrolovat běh, upravovat parametry, eventuelně jinak zasahovat do real-time aplikace běžící třeba na „druhém konci“ světa. Princip běhu aplikace na real-time systému, která pro komunikaci s operátorem využívá klasické PC je na obrázku 38.



Obr. 38 Princip real-time aplikace v Labview

Tento princip od sebe vlastně „roztrhne“ Front panel a Block diagram. Block diagram – tedy vlastní program je umístěn na real-time systému. Tam tedy program i běží, může využívat všechny výhody tohoto systému. Front panel s ovládacími a zobrazovacími prvky je umístěn na klasickém PC. Na tomto PC musí být pochopitelně nainstalováno Labview, aby si operační systém počítače s čelním panelem poradil. Pokud nepotřebujeme z PC real-time systém i programovat, stačí pro zobrazování čelního panelu místo kompletního Labview instalovat na PC jen Labview Run-time engine. O přenos informace mezi Front panelem a Block diagramem se nemusí tvůrce aplikace nijak starat. Probíhá automaticky. Po vytvoření aplikace stačí „zatrhnout“, že poběží na real-time systému a vše ostatní obstará již Labview. Předtím je pochopitelně nutné nastavit všechny parametry TCPIP spojení, aby o sobě systémy „věděly“. Toto funguje bez problémů, pokud objem přenášených informací není příliš velký. Když jsem se tímto způsobem pokoušel realizovat software pro řízení plošiny, chtěl jsem mít na čelním panelu graf s průběhy žádaných hodnot a skutečných poloh jednotlivých válců. Vzhledem k velké rychlosti běhu regulační smyčky se v Labview 7.1 nestíhal přenos dat pro graf, ten se zobrazoval trhaně s výpadky. Pro přenosy větších objemů dat bylo nutno použít systém Labview TCPIP server a Labview TCPIP klient. To již bylo programátorsky poměrně náročné řešení. Dříve, než se mi podařilo realizovat tuto cestu, přišlo Labview 8. To zaprvé zrychlilo přenos informací mezi systémy a za druhé zavedlo pro komunikaci úplně nový prostředek – síťově sdílené proměnné. Síťově sdílená proměnná nahrazuje jednoduchým uživatelsky přátelským způsobem TCPIP přenos server-klient. Pracuje se s ní podobně jako s klasickou globální proměnnou. Při tomto způsobu komunikace se nepřenáší čelní panel real-time aplikace na PC, aplikace běží bez zobrazení čelního panelu. Na PC je umístěna další zcela samostatná aplikace, která obsahuje ovládací a zobrazovací prvky. Na libovolném ze systémů jsou umístěny síťově sdílené proměnné, na které „vidí“ obě aplikace a mohou si tedy pomocí nich předávat data. Tento princip je tedy oproti předchozímu způsobu složitější o nutnost tvorby další samostatné aplikace běžící na PC a vytvoření systému síťově sdílených proměnných. Přenos dat je ale mnohem rychlejší. Tímto způsobem pak může komunikovat libovolný počet aplikací běžících na libovolném počtu počítačů. Dále lze pochopitelně kombinovat oba způsoby, tj. přenášet čelní panel real-time aplikace a pro datově náročné toky zároveň využít síťově sdílené proměnné. Labview 8 dále umožňuje sdružit všechny potřebné aplikace do projektu, kde se přesně rozvrhnou struktura, umístění a systém komunikace všech použitých aplikací. Tyto výhody se mi jevily natolik výhodné, že byl u plošiny systém Labview 7.1 povýšen na verzi 8.2 a v ní byla pak vytvořena současná verze ovládacího softwaru. Na obrázku 39 je zobrazen princip komunikace pomocí síťově sdílených proměnných, pro jednoduchost opět jen mezi jedním real-time systémem a jedním PC.





**Obr. 39 Komunikace aplikací pomocí síťově sdílené proměnné**

U všech typů komunikace je nutno mít na zřeteli, že z hlediska bezpečnosti chodu celého systému se dá zaručit jen vysoká spolehlivost běhu aplikace na real-timovém systému. Spolehlivost chodu aplikace umístěné na klasickém PC je již ohrožena typem použitého operačního systému a i výpadky v síťovém spojení jsou pochopitelně možné. Z tohoto hlediska je nutné, aby vše potřebné pro bezpečný chod systému bylo umístěno na real-timovém systému. V případě jakéhokoli výpadku kdekoli v navazujících prostředcích tak dojde jen k nemožnosti komunikace s aplikací. Vlastní aplikace běží dál, plní svou např. regulační funkci, jen ji nejde ovládat a zobrazovat její stav. Všechny funkce se obnoví po odstranění poruchy – např. restartu PC. Pokud je třeba mít možnost zasáhnout do běhu real-time aplikace i při výpadku komunikace, musí se pro tuto funkci využít přímo nějaké vstupy real-time systému, tedy například logické vstupy I/O karty a snímání stavu těchto vstupů musí být naprogramováno v aplikaci.

Ze všech výše popsaných možností jsem vycházel při sestavování struktury softwarových prostředků pro řízení plošiny. Na operátorském PC je nainstalováno kompletní prostředí Labview 8.2 pro vytváření a následný běh aplikací a dále kompletní Measurement and Automation Explorer pro práci se vstupně výstupními kartami. Na PXI systému je odpovídající verze real-time Labview 8.2 a ovladače pro instalované karty. Struktura nainstalovaných programů je vidět na obrázku 40.



**Obr. 40 Struktura nainstalovaných komponent Labview 8.2**

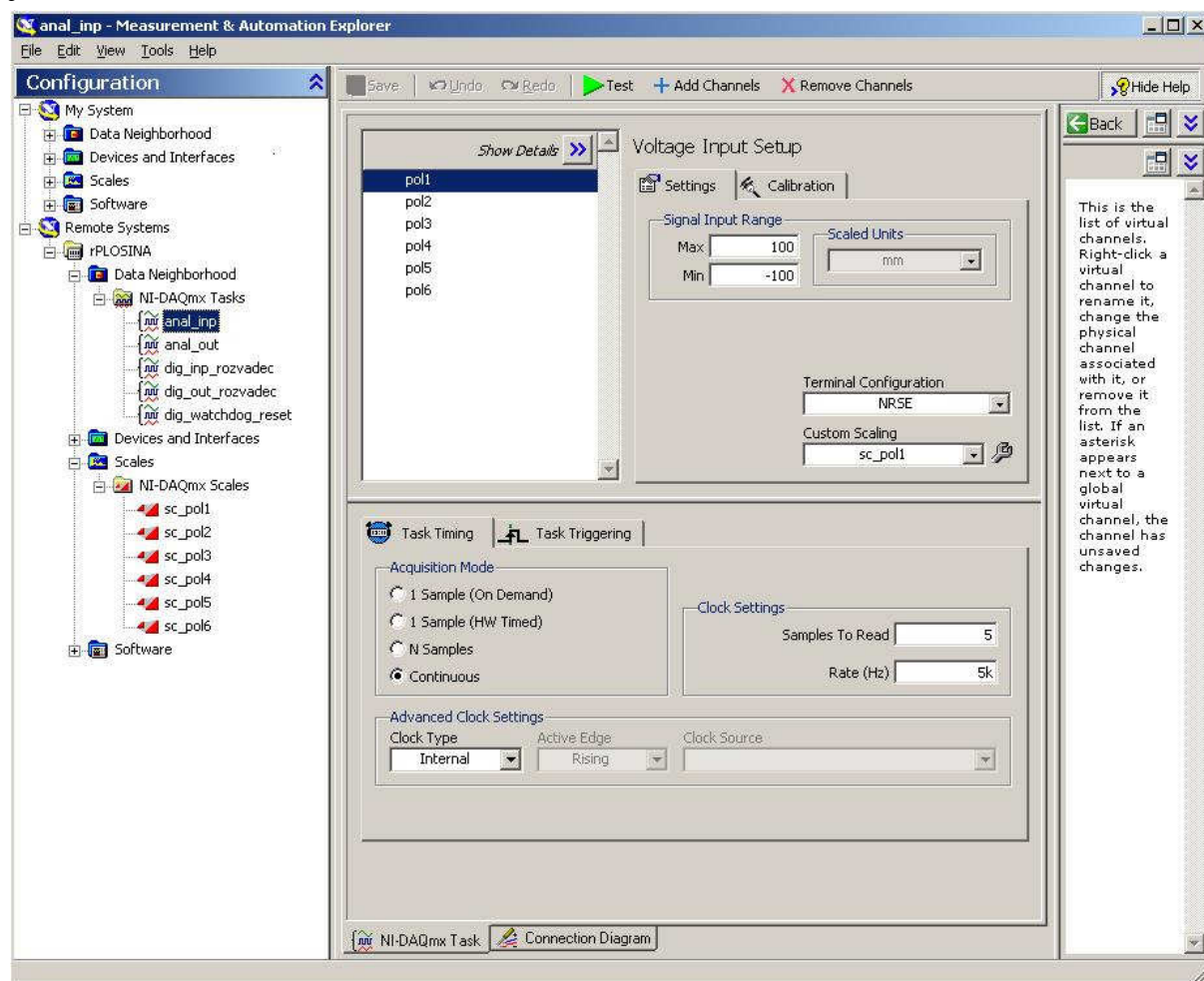
### 3.2.2. Komunikace Labview se vstupně výstupními kartami

Předpokladem pro komunikaci mezi vstupně výstupními kartami (dále jen I/O karty) a softwarem Labview je přítomnost ovladačů těchto zařízení. Instalace ovladačů a základní nastavení parametrů I/O karet je v prostředí National Instruments soustředěno do Measurement and Automation Exploreru (pro tento software se běžně používá zkratka MAX, proto si ji v dalším textu dovoluji použít i já). Veškeré současně používané I/O karty mají zabudovanou autodetekci, takže je po jejich vložení do systému MAX automaticky detekuje a nainstaluje potřebný ovladač. V prostředí MAXu se dále dají nastavit výchozí (default) parametry těchto prostředků, které jsou pak použity vždy po zapnutí napájení. Z Labview se pak k takto zprovozněným I/O kartám dá přistupovat na několika úrovních. Hitem posledních verzí Labview jsou takzvané „expres“ funkce, které umožňují komunikovat s těmito zařízeními i uživateli bez hlubších znalostí jejich činnosti. Jsou to vlastně jakási „makra“ s jednoduše editovatelnými parametry. Za jejich použití v programu se ale pochopitelně platí „bobtnáním“ kódu a tím v důsledku zpomalováním běhu. Střední úroveň přístupu je zastoupena sadou klasických (nebo v novějších verzích Labview „mx“) funkcí. Zde již programátor pracuje přímo s jednotlivými HW prostředky karty, ale obrací se na ně symbolicky, pomocí přiřazených jmen. Tato úroveň je dle mého názoru dostatečná pro většinu aplikací, umožňuje napsat efektivní kód s dostatečným přehledem o tom „co se v danou chvíli děje“. Poslední úroveň přístupu vychází ze střední úrovně, ale na jednotlivé HW prostředky karty se přistupuje již přímo pomocí jejich adres. Zrovna tak je nutno například přímo na konkrétních adresách paměti vytvořit buffery pro přenos dat apod. To je již poměrně extrémní přístup a své opodstatnění nalezne jen ve vyjímečných aplikacích. Já se tedy vrátím do střední úrovně, protože takto jsem vytvářel i software pro plošinu. Tato úroveň totiž ještě nabízí dvě možnosti, jak s I/O kartou pracovat. Pokud je potřeba často měnit parametry činnosti I/O karty, pak je lepší použít první variantu, kdy se veškeré nastavení provádí přímo z programu v Labview. Příkladem takového využití může být karta s analogovými vstupy a obecný program pro měření a uložení dat. Tady se předpokládá, že při každém použití bude potřeba jiný počet vstupů, bude se měnit vstupní citlivost (zesílení), přepočtení algoritmus z měřených voltů na konkrétní jednotky, vzorkovací frekvence, doba měření, atd. Pokud má tedy program takto obecně sloužit širokému okruhu úloh, je vhodné, aby se nastavování všech parametrů dalo ovládat přímo z aplikace. Takto vytvořenou aplikaci lze také jednoduše přenášet mezi více počítači, aplikace běží samostatně (potřebuje jen nainstalované ovladače karet). Druhá varianta je naopak představována jednoúčelovým zařízením, kde je třeba všechno výše vyjmenované nastavit také, ale udělá se to jen jednou při uvádění zařízení do chodu a dále se tyto parametry již nemění. Ani zde se pochopitelně nevylučuje možnost nastavit parametry přímo z aplikace v Labview, ale ve své podstatě to představuje zbytečnou práci programátora, který se musí zabývat tvorbou kódu, který se pak použije jen jednou. Pro takovéto aplikace je efektivnější využít opět možností prostředí MAX, který umožňuje definovat úlohy (tasks) pro práci s kartami. V každé úloze se dají jednoduše nastavit veškeré parametry a aplikace Labview se jednoduše obrátí přímo na takto nadefinovanou úlohu. To představuje zjednodušení kódu pro práci s I/O kartami. Na druhé straně, takto napsaná aplikace je pak závislá na konkrétním počítači a MAXu. Na jiném počítači aplikace poběží až po dodefinování shodných úloh do MAXu (úlohy lze z MAXu exportovat do souboru a do jiného opět ze souboru importovat). U jednoúčelových aplikací se ale právě takovýto přenos nepředpokládá.

Systém pro řízení plošiny je velmi jednoúčelová aplikace, takže jsem při tvorbě softwaru použil variantu dvě. Definice všech parametrů v MAXu má totiž dále tu výhodu, že například při rekaliibraci snímačů polohy, kdy je třeba opravit převodní konstanty snímačů, není nutno zasahovat do hotové aplikace. Nové přepočtení konstanty se jednoduše zadají v MAXu a tím je „problém“ vyřešen.

### 3.2.3. Definice úloh v prostředí Measurement and Automation Explorer

Konkrétní rozvržení úloh pro obsluhu všech I/O prostředků potřebných pro ovládání plošiny je znázorněno na obrázku 41.

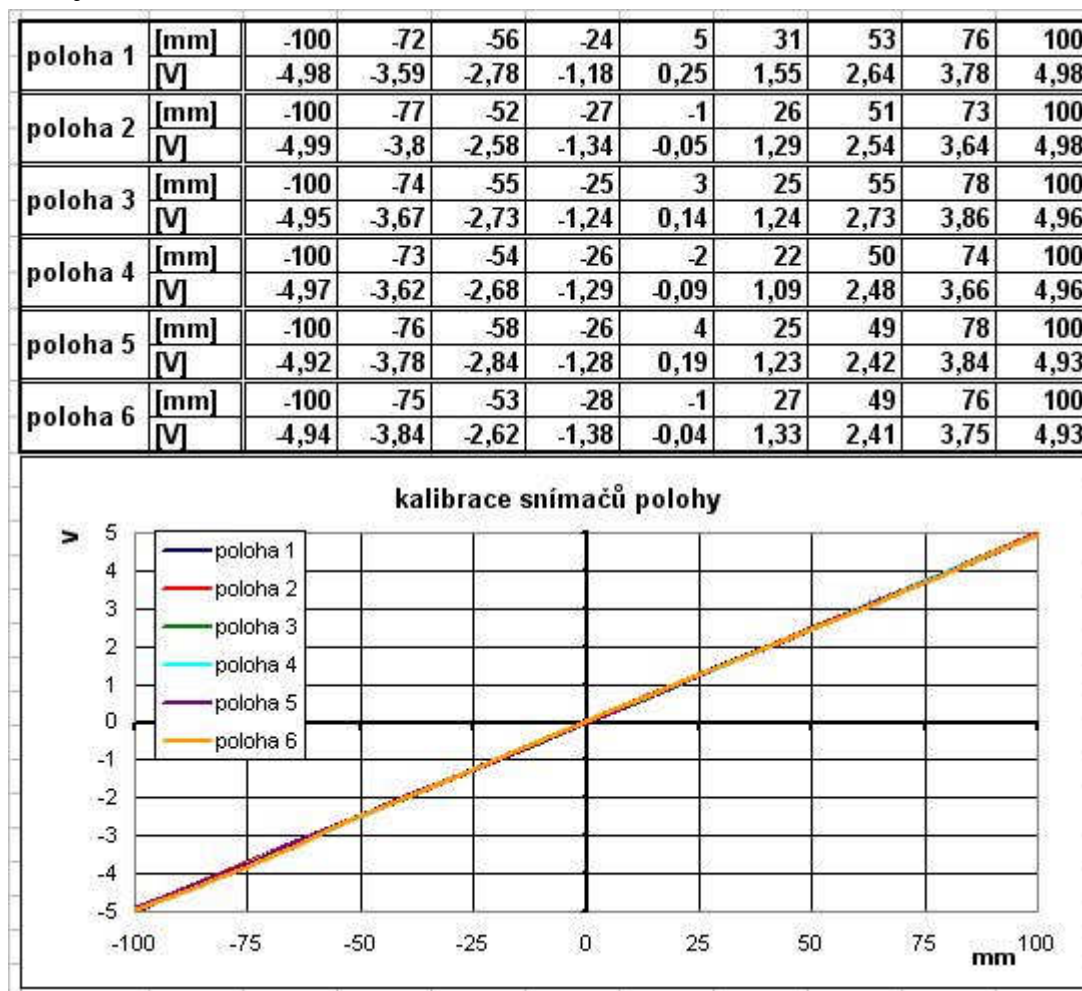


Obr. 41 Rozvržení úloh pro ovládání I/O prostředků

#### úloha anal\_in

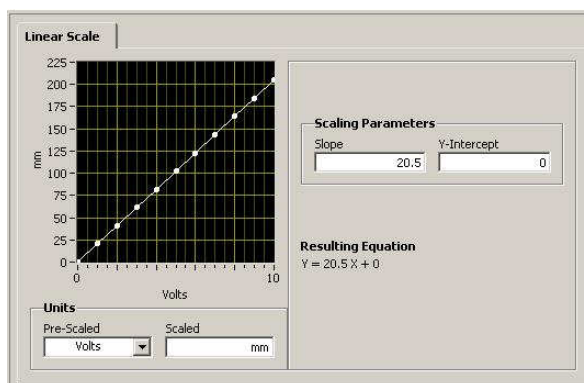
Slouží pro vstup měřených hodnot ze snímačů polohy jednotlivých válců. Konkrétní nastavení této úlohy je vidět opět na obrázku 41 v jeho pravé části. Zde jsem nadefinoval šest kanálů **pol1** až **pol6**, které jsou přiřazeny na prvních šest analogových vstupů karty PXI 6040E. Pro přepočet měřených voltů na milimetry je definováno šest měříték (scales) **sc\_pol1** až **sc\_pol6**. Každý vstup polohy má tedy přiřazeno svoje vlastní měřítko. Všechny vstupy mají shodně nastavený rozsah na  $\pm 100\text{mm}$ . Sběr dat je nastaven na spojitě měření časované interním čítačem karty. Frekvence snímání je 5kHz. Tento způsob nezpomaluje běžící softwarovou smyčku prací s hardwarem karty, jak by tomu bylo při přímém odečtu jednoho vzorku. Karta plní data do bufferu v paměti počítače a software je vyčítá odtud. Vzorkovací frekvence snímání dat je navíc vyšší než doba jednoho průchodu smyčkou (ta je nastavena na 1kHz). Tím je zajištěno, že při každém průchodu smyčky jsou k dispozici data ze vstupů, smyčka nemusí čekat na eventuelní doměření dat. Dále je pro každý průchod regulační smyčky k dispozici více vzorků pro každý kanál. Z nich se vypočte průměr a ten použije jako vstup skutečné hodnoty do PID regulátoru. Průměrováním více vzorků se omezí vliv šumu a možné náhodné poruchy v měřicím řetězci.

Přepočtení hodnoty pro měřítka byly získány kalibrací snímačů polohy jednotlivých válců. Při vypnuté hydraulice byly pístnice válců mechanicky (působením vnější síly vyvozené ručně pákou) posouvány od jedné krajní polohy k druhé po několika krocích. V každém kroku byla změřena skutečná poloha pístnice pomocí cejchovaného posuvného měřítka a odečtena hodnota měřených voltů – hodnota se dá zobrazit přímo v prostředí MAXu. výsledky kalibrace jsou na obrázku 42.



Obr. 42 Kalibrace snímačů polohy

Z grafu je patrná praktická linearita všech snímačů. Z tohoto důvodu jsem pro přepočet zvolil pro všechny polohy lineární měřítko. Příklad nastavení měřítka pro jeden ze vstupů v prostředí MAXu je na obrázku 43.

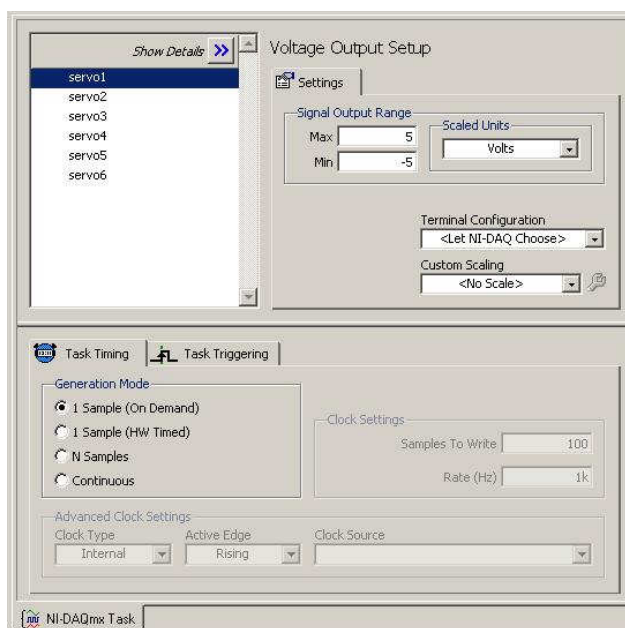


Obr. 43 Příklad nastavení lineárního měřítka



### úloha anal\_out

Slouží pro výstup analogového napětí pro ovládání servoventilů jednotlivých motorů. Je zde opět nadefinováno šest kanálů *servo1* až *servo6*, které jsou přiřazeny na prvních šest analogových výstupů karty PXI 6713. Výstupní rozsah je nastaven na  $\pm 5\text{V}$ . Pro výstup není použito žádné přepočtení měřítko, a výstup dat je nastaven pro přímý zápis hodnoty ze softwaru. Tady jiné řešení není, PID regulátor vypočte vždy při každém průchodu smyčkou právě jednu hodnotu a tu je třeba „poslat“ servoventilům. Nastavení parametrů této úlohy je vidět na obrázku 44.



Obr. 44 Nastavení analogových výstupů v úloze anal\_out

### úloha dig\_inp\_rozvadec

Slouží k přenosu stavu jednotlivých obvodů výkonového rozvaděče do programu. Úloha přiřazuje všech 24 logických vstupů karty PXI 6528, do jednoho dvacetičtyřbitové pole. Na jednotlivé vstupy je přivedeno napětí z kontrolních bodů rozvaděče a aplikace tak získává například informace o stavu tlačítek TOTAL STOP, sepnutí jednotlivých stykačů atd. Protože se převážná část těchto informací týká obvodů bezpečnostního systému, bude přiřazení kontrolních bodů jednotlivým vstupům popsáno až v kapitole bezpečnostního systému.

### úloha dig\_out\_rozvadec

Slouží k ovládání výkonových relé v rozvaděči. Úloha přiřazuje šestnáctibitové logické pole na prvních 16 výstupních linek karty PXI 6528. Prvních osm výstupů ovládá výkonová relé v rozvaděči a jejich přiřazení bylo uvedeno v kapitole 3.1.4 na obrázku 32. Zbylé bity slouží opět pro komunikaci s bezpečnostním systémem a jejich význam bude popsán v kapitole o tomto systému.

### úloha dig\_watchdog\_reset

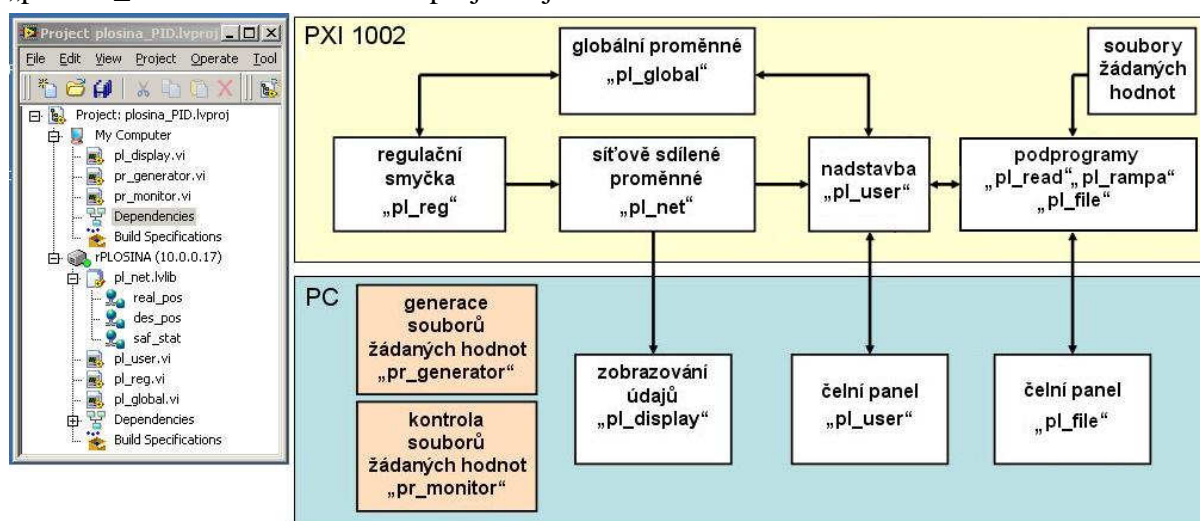
Slouží k nastavení výchozího stavu výstupního relé obvodu watchdog. Úloha přiřazuje jeden bit na výstup číslo 24 karty PXI 6528. Ten byl použit jako výstupní signál obvodu watchdog karty PXI 6528. Na kartě jsou obvody čítače – časovače, které mohou být nastaveny do funkce obvodu watchdog. Princip této funkce spočívá v čítání impulsů z přesných hodin na kartě. Software musí provést reset čítače dříve, než dojde k jeho naplnění po předem zadanou hodnotu. Pokud k resetu nedojde včas a čítač dosáhne přednastavenou hodnotu (což svědčí o

nějaké nepravdivosti běhu softwarové aplikace), aktivuje se přiřazený logický výstup. To je jeden ze signálů pro bezpečnostní systém, který převezme řízení a zastaví pohyb plošiny. Stav relé zůstane zachován a pro další činnost je třeba nastavit opět výchozí stav. Přepnutí relé do výchozího stavu zajišťuje právě tato úloha.

### 3.2.4. Struktura programu řídicího systému

Při navrhování struktury programu pro řízení plošiny jsem vycházel z důležitosti požadavků, které má systém plnit. Nejdůležitějším úkolem je bezesporu funkce šesti PID regulátorů polohy jednotlivých motorů. Regulační smyčka musí být přesně časována a její pravidelný chod musí být naprostou prioritou systému. Mimo to musí software ale plnit další pomocné funkce, převážně typu zajištění komunikace s operátorem a automatizace často opakovaných úloh (např. sekvence zapnutí, vypnutí, najetí do výchozí polohy apod.). Tyto „obslužné“ činnosti již nemusí být tak přesně časované, naopak jejich vykonávání nesmí ohrozit pravidelnost běhu regulační smyčky. Další částí softwaru pak budou pomocné prostředky, které již nebudou provozovány v reálném čase. Sem bych zařadil například generátor funkcí, který umožní vygenerovat soubory žádaných hodnot poloh pro jednotlivé motory.

Labview 8.2. umožňuje soustředit celou strukturu použitých softwarových prostředků do jednoho projektu. V něm se přesně určí, která část softwaru poběží na jakém hardwaru a jak bude komunikovat s ostatními částmi softwaru. Pro řízení plošiny jsem proto založil projekt „plosina\_PID“. Struktura tohoto projektu je vidět na obrázku 45.



**Obr. 45 Struktura projektu plosina\_PID**

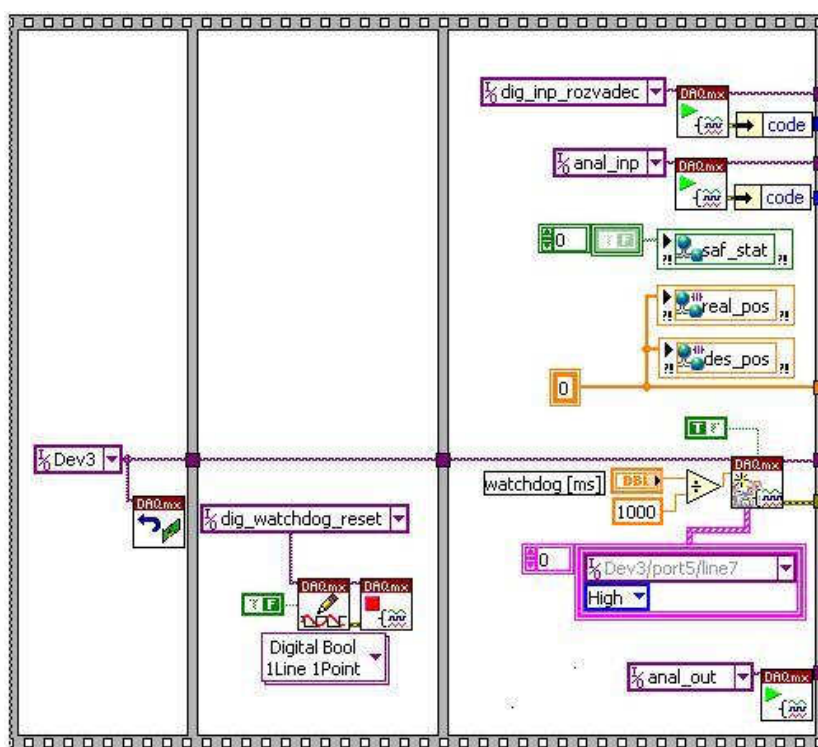
V levé části je skutečný strom projektu v Project Exploreru Labview, v pravé části obrázku pak schematická struktura součinnosti jednotlivých částí projektu. Na systému PXI 1002 běží paralelně dvě aplikace – regulační smyčka *pl\_reg* a nadstavba *pl\_user*, které spolu komunikují přes systém globálních a síťových proměnných. Aplikace *pl\_reg* zajišťuje změření skutečných hodnot polohy, výpočet akčních veličin pro serva a jejich zápis na analogové výstupy. Dále přečtení logických stavů rozvaděče a bezpečnostního systému. Aplikace *pl\_user* vykonává všechny nastavbové funkce a dodává regulační smyčce přes globální proměnnou žádané hodnoty poloh. Tím je regulační smyčka oproštěna od nutnosti přístupu na disk, který by mohl ohrozit časování smyčky. Čelní panel aplikace *pl\_user* je zobrazován na monitoru operátorského PC a obsahuje povelová tlačítka pomocí kterých operátor obsluhuje činnost zařízení. Datový přenos je minimální, proto lze bez problémů použít metodu zobrazení čelního panelu aplikace na PC. Aplikace *pl\_reg* běží bez zobrazení čelního panelu. Data z aplikace *pl\_reg*, která je potřeba zobrazit na monitoru operátora, tedy průběhy žádaných a skutečných hodnot poloh a stav obvodů rozvaděče, smyčka *pl\_reg* pouze

předává do síťových proměnných. Odtud je vyčítá samostatná aplikace *pl\_display*, která již celá běží na operátorském PC. Tento systém umožňuje plynulý přenos velkého toku dat, aniž by bylo ohroženo časování regulace.

Do projektu patří ještě dvě nezávislé aplikace, které se již přímo neúčastní řízení plošiny. Obě se v případě potřeby spouští na operátorském PC. První z nich je *pr\_generator*. Tato aplikace slouží ke generaci souborů žádaných hodnot polohy, které se pak používají při řízení pohybu plošiny. Umožňuje generovat bloky periodických funkcí nebo číst externě dodaná data z textových souborů. Pro kontrolu již vygenerovaných souborů slouží druhá aplikace *pr\_monitor*. Její funkce je prostá – umožňuje pouze do grafu zobrazit průběhy žádaných hodnot, aby mohly být operátorem zkontrolovány ještě před použitím pro řízení. Datové soubory se z operátorského PC na real-time systém přenáší FTP propojením obou systémů.

### 3.2.5. Aplikace *pl\_reg*

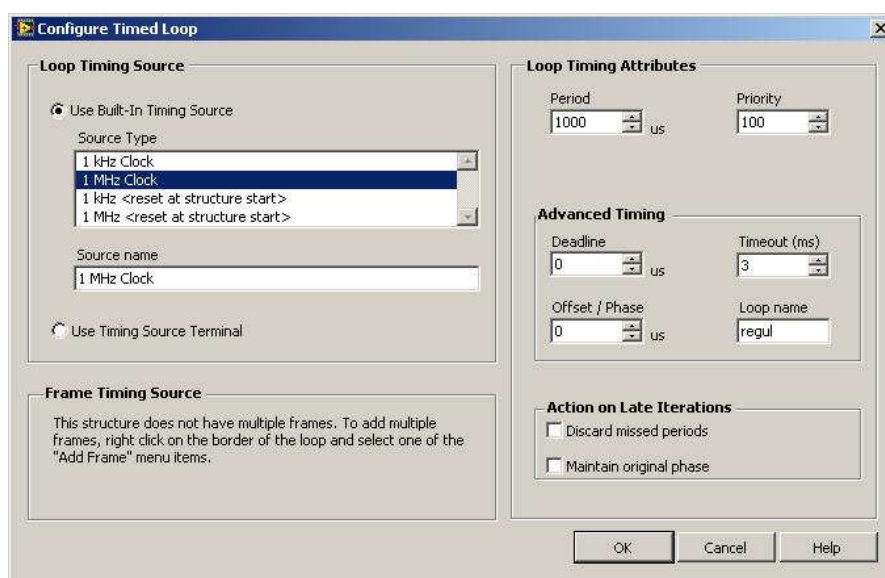
Tato aplikace tvoří základ celého softwarového vybavení. Jejím hlavním úkolem je realizace šesti PID regulátorů polohy. Aplikace se dá rozdělit do třech částí. V první jde o počáteční inicializaci úloh – ta proběhne pouze jednou při startu, druhá část je vlastní regulační smyčka – ta probíhá periodicky po celou dobu běhu. Při ukončování činnosti aplikace je třeba zakončit činnost úloh, to je třetí část aplikace. První, inicializační sekce, je uvedena na obrázku 46.



Obr. 46 Inicializační část aplikace *pl\_reg*

Nejprve se provede reset karty PXI 6528. Tím se zajistí vypnutí všech relé, která mohla zůstat po nějakém předchozím nekorektním ukončení v náhodném stavu. V druhé části sekvence se pomocí úlohy *dig\_watchdog\_reset* nastaví výchozí stav relé watchdog – to je naopak v klidu sepnuto, takže předchozí reset ho uvedl do špatného stavu. Třetí část sekvence startuje činnost všech úloh potřebných pro činnost regulační smyčky, tj. úlohu čtení skutečných poloh *anal\_inp* a úlohu *anal\_out* pro zápis akčních zásahů do servoventilů. Dále se spouští úloha *dig\_input\_rozvadec* pro čtení stavu rozvaděče a inicializuje se watchdog nastavením kritického času. Zároveň se zápisem prázdných polí inicializují síťové proměnné. *Real\_pos* a *des\_pos* slouží k přenosu skutečných a žádaných hodnot poloh a proměnná *saf\_stat* k přenosu

stavu rozvaděče. V Labview není obecně nutné žádnou proměnnou deklarovat předem a tak je tomu pochopitelně i v případě síťově sdílených proměnných. První zápis do těchto proměnných však trvá „neskutečně“ dlouho. To způsobovalo překročení doby watchdog při prvním průchodu regulační smyčkou a tím docházelo ihned po startu aplikace k aktivaci hlídacího obvodu. Zápisem do těchto proměnných ještě před startem čítače watchdog jsem tento problém po dlouhém experimentování vyřešil. Po této inicializační sekvenci následuje již regulační smyčka. Z prostředků Labview smyčka využívá strukturu *Timed loop*, což je obdoba klasického cyklu *While loop*, ale opakování cyklu je časováno hardwarovými prostředky. V praxi to znamená, že po provedení všech operací uvnitř cyklu systém čeká na uplynutí nastaveného časového intervalu a potom teprve spustí další běh cyklu. V případě, že by provedení instrukcí uvnitř cyklu zabralo více času, bude cyklus spuštěn okamžitě a informace o zpoždění běhu je uložena v logické proměnné *finished late*, což je jedna ze stavových proměnných smyčky *Timed loop*. Programátor si dále může nechat vypisovat časy skutečného spuštění a dokončení smyčky a tím může při ladění aplikace získat přehled o časové rezervě, kterou má k dispozici pro instrukce uvnitř cyklu. Časování je odvozeno od taktovací frekvence procesoru a v real\_time systému PXI je k dispozici frekvence 1MHz, tj. časový interval se dá programovat po mikrosekundách. V této aplikaci je časování nastaveno na 1ms (1000  $\mu$ s) a smyčka má dále nastavenou nejvyšší prioritu běhu. Nastavení časování je vidět na obrázku 47.

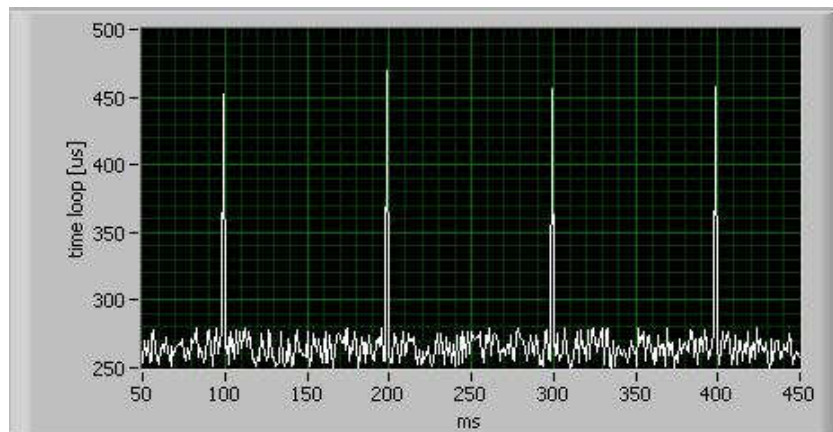


Obr. 47 Časování smyčky regulace

Při časování se dále dá nastavit priorita běhu a fáze spuštění oproti eventuelně paralelně běžícím cyklům. Tímto se dá například zajistit paralelní běh dvou cyklů, které oba poběží s krokem jedné milisekundy, ale jejich start bude vzájemně posunut o půl milisekundy. Tím se může dosáhnout lepšího rozložení výkonu procesoru pro vykonávání obou smyček. Aplikaci *pl\_reg* jsem nastavil maximální prioritu a fázi na nulu. Důvodem je právě paralelní běh dalšího cyklu, jehož smysl bude popsán dále. Pochopitelně mě zajímala i časová náročnost instrukcí uvnitř cyklu, aby měl systém pokud možno nějakou rezervu a tím nebylo časování smyčky ohroženo dlouhou dobou trvání instrukcí uvnitř cyklu. Proto jsem si během ladění nechal graficky zobrazovat dobu vykonávání instrukcí. Záznam vznikl při reálném běhu všech aplikací při provozu plošiny. Ze záznamu je patrné, že instrukce v cyklu se vykonají přibližně za 270  $\mu$ s. Odchylinky jsou patrně způsobené čekáním na ucelený počet vzorků analogových vstupů polohy. Jednou za 100 ms je vždy doba vykonání delší a pohybuje se mezi hodnotami 450 a 500  $\mu$ s. To je způsobeno přesunem pole žádaných hodnot z globální proměnné, kdy se zvyšuje počet vykonávaných instrukcí – tento princip bude vysvětlen dále. Nyní je důležité konstatování, že během kontrolního měření nikdy nedošlo



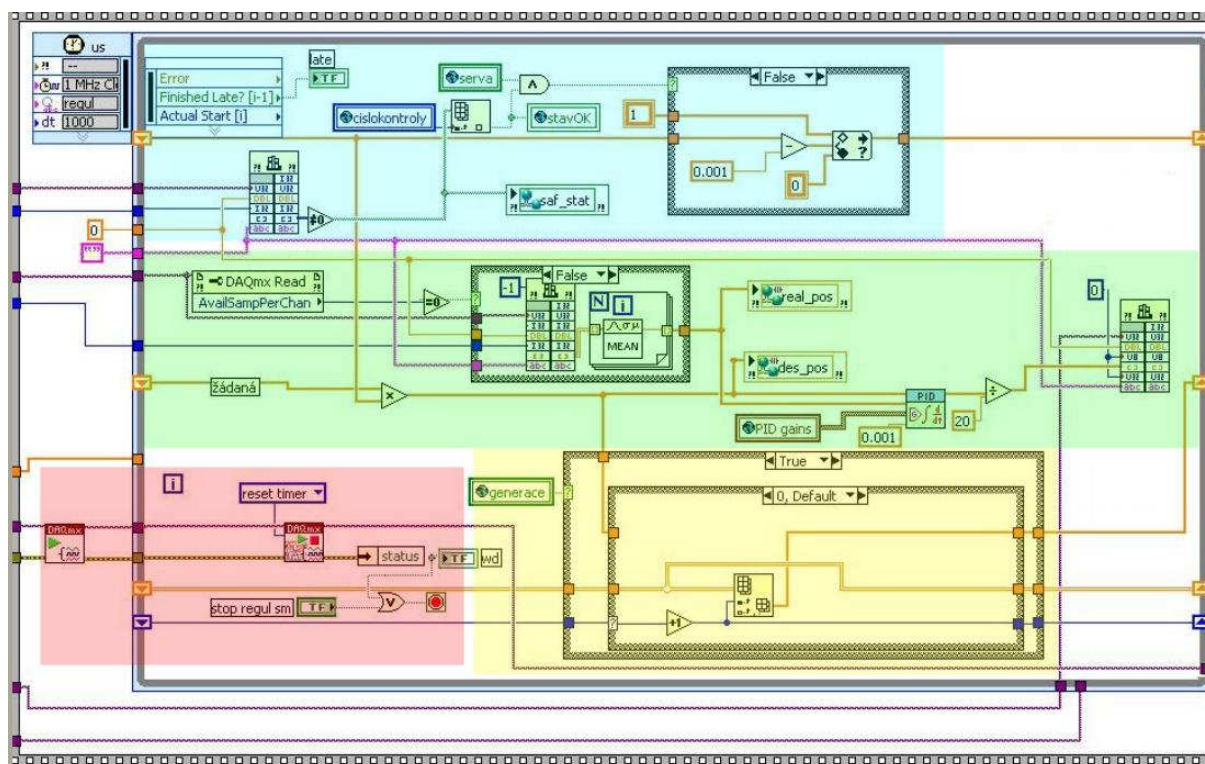
k překročení 500  $\mu$ s a tedy v časování smyčky na 1 ms je i v nejhorším případě zhruba 50ti procentní rezerva. Grafické znázornění reálného časování je na obrázku 48.



Obr. 48 Záznam skutečné doby vykonání instrukcí uvnitř cyklu

Provedené měření dává předpoklad, že během činnosti nebude docházet k nepravdělnostem běhu vlivem dlouhotrvajících instrukcí. To potvrzuje i fakt, že během dosavadní činnosti zařízení nikdy nebyl překročen čas nastavený v čítači watchdog a systém nebyl nikdy z tohoto důvodu odstaven.

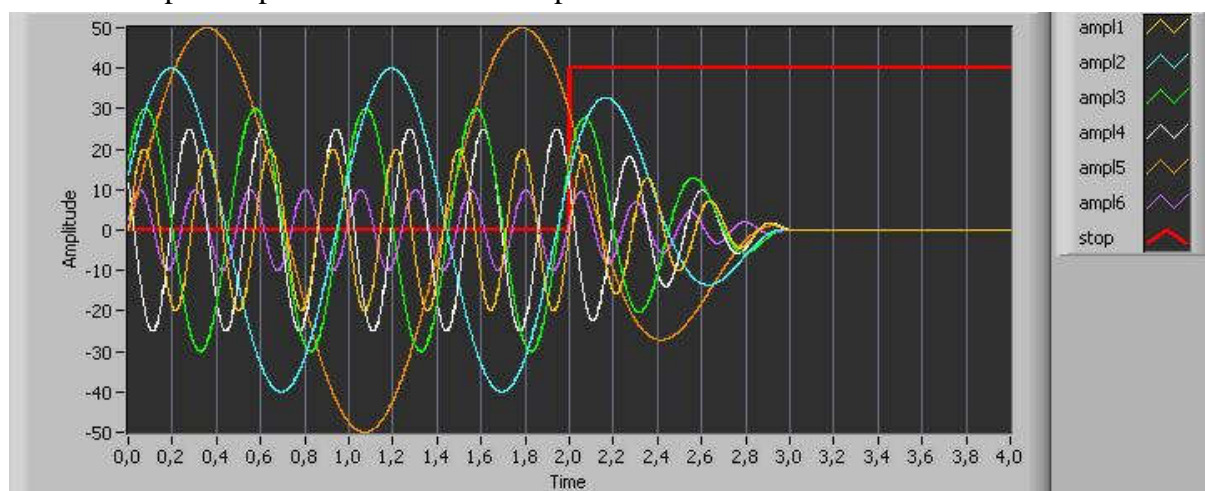
Vlastní *Timed loop* smyčka je umístěna v dalším poli sekvence, které následuje bezprostředně po inicializační sekvenci (viz obr.46). V celkovém blokovém diagramu aplikace leží tedy inicializace vlevo od tohoto okna. Uspořádání smyčky *Timed loop* je na obrázku 49.



Obr. 49 Uspořádání smyčky Timed loop v aplikaci pl\_reg

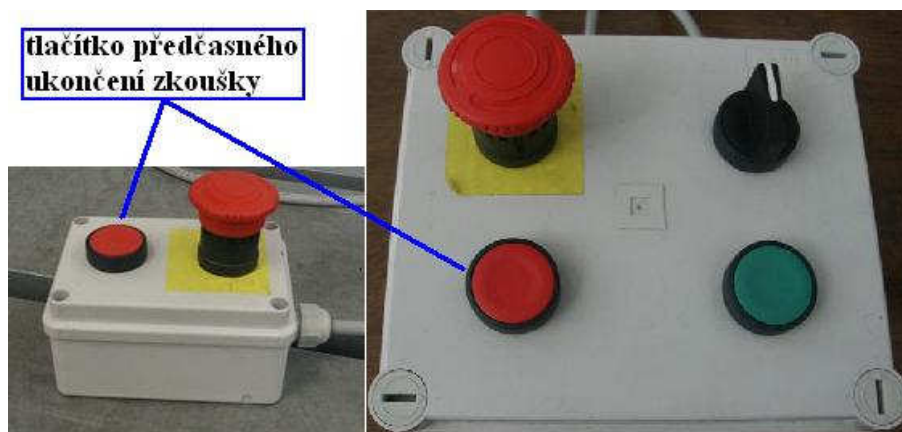
Ve smyčce běží paralelně několik akcí. V popisu začnu červeně podbarvenou částí vlevo dole, ta se totiž týká již několikrát zmíněného obvodu watchdog. Teprve bezprostředně před spuštěním smyčky se odstartuje čítač watchdog (startovací příkaz je vlevo před vstupem do smyčky). V každém průchodu smyčkou se pak čítač resetuje a tím nedojde k překročení nastaveného času.

Další běžící akce je naopak v horní části okna zvýrazněna modrou barvou. V ní se čte stav logických vstupů, které signalizují stav výkonových obvodů rozvaděče a bezpečnostních obvodů. Tento stav se předá do síťové proměnné *saf\_stat*, aby mohl být zobrazen na monitoru operátora. To je jeden z požadavků normy – operátor musí mít přehled o stavu výkonových obvodů. Zároveň je však využit i pro možné ovlivnění běhu regulační smyčky. Při provozu plošiny totiž může nastat množství poruchových stavů, které vyhodnotí bezpečnostní systém a začne zastavovat provoz zařízení. Některé z poruch však nejsou úplně kritické a nevyžadují okamžité zastavení. Bezpečnostní systém na ně proto reaguje s nastaveným zpožděním 3 sekund. Výskyt poruchy je ale okamžitě přečten v regulační smyčce. Informace o tom, která z poruch se takto má detekovat, je zapsána nadřazenou aplikací *pl\_user* do globální proměnné. Po detekci poruchy se nastartuje proces útlumu žádaných hodnot – žádané hodnoty se prostě začnou násobit koeficientem, který se snižuje od jedné k nule. Tento proces trvá 1 sekundu. Po jedné sekundě je tedy pohyb programově zastaven – žádaná hodnota je trvale násobena nulou a plošina stojí ve střední poloze. Za další 2 sekundy pak již reaguje bezpečnostní systém, který plošinu definovaným způsobem vypne. Tímto procesem se prakticky eliminuje výskyt rázů, které mohou vzniknout při „tvrdém“ zásahu bezpečnostního systému při větších rychlostech pohybu. Praktická ukázka útlumu žádaných hodnot při detekci poruchy je vidět na grafickém záznamu na obrázku 50. Ten byl pořízen při simulované poruše při kontrolních testech provozu.



**Obr. 50 Útlum žádaných hodnot při detekci poruchy**

Na grafu je vidět šest žádaných hodnot polohy. V čase 2 sekundy byl simulován výskyt poruchy (zobrazeno červenou křivkou) a během jedné sekundy byly žádané hodnoty plynule vynulovány a tím se pohyb plošiny zastavil ve střední poloze. Pak následovalo vypnutí bezpečnostním systémem, které se již nijak neprojevuje na žádaných hodnotách a proto není v grafu patrné. Tato měření budou pochopitelně uvedena v kapitole o bezpečnostním systému. Tímto způsobem je ošetřeno i předčasné ukončení zkoušky. Testovaná osoba musí mít možnost kdykoliv (například z důvodu nevolnosti) zkoušku ukončit. Aby toto ukončení nebylo závislé na funkční komunikaci s operátorským počítačem (v kapitole 3.2.1 jsem poukázal na nutnost zajistit možnost nouzového ovládání real-time aplikace právě při výpadku této komunikace), je vyřešeno tlačítky předčasného ukončení zkoušky. Jedno má testovaná osoba, druhé je na operátorském pracovišti. Stlačení kteréhokoliv z těchto tlačítek je bezpečnostním systémem zpracováno jako nekritická porucha a tím spuštěn výše popsany proces. Tak je zajištěna možnost kdykoliv plynule zastavit pohyb plošiny i při eventuelním výpadku operátorského PC nebo komunikace. Tlačítka předčasného ukončení zkoušky testované osoby (vlevo) a operátora (vpravo) jsou na obrázku 51.

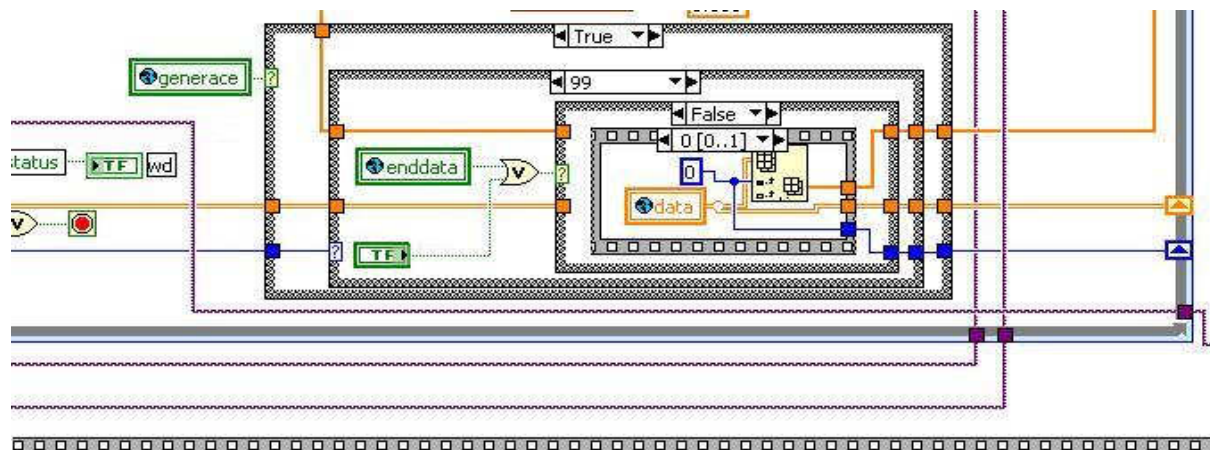


Obr. 51 Tlačítka předčasného ukončení zkoušky

Nyní se konečně dostane na popis té nejdůležitější funkce této smyčky – vlastní regulace. Toto pořadí jsem zvolil proto, že tato část úzce spolupracuje s aplikací *pl\_user*, která bude popsána hned v další kapitole. Ve smyčce *Timed loop* je regulace podbarvena zeleně. Nejprve se přečtou skutečné hodnoty polohy. Úloha *anal\_inp* měří polohy s frekvencí 5kHz, proto je v každém průchodu smyčky k dispozici pět hodnot pro každý kanál, ze kterých se spočte průměr. Pole šesti skutečných poloh se zapíše do síťové proměnné *anal\_pos* pro účely zobrazení na monitoru operátora a zároveň se vede jako skutečná hodnota do regulátoru PID. Žádané hodnoty polohy pro regulaci jsou získány ve žlutě podbarvené části (tato činnost bude vysvětlena dále). Ještě před vstupem do regulátoru je pole žádaných hodnot násobeno konstantou pro útlum amplitudy (v normálním provozu je tato konstanta rovna jedné). Pole žádaných hodnot se pak zapisuje do proměnné *des\_pos* (opět pro účely zobrazení) a vede na vstup PID regulátoru. Ten je tvořen podprogramem *PID*, který byl koupen jako rozšíření instalace Labview. Proces výpočtu akční veličiny je tedy profesionální výrobek National Instruments. Zde je nutno poznamenat, že v rámci experimentování jsem v původní verzi softwaru vytvořil i vlastní podprogram regulace, který však disponoval jen regulátorem PI. Výsledky regulace byly srovnatelné, plošina dlouho uspokojivě „chodila“ s tímto regulátorem. Při přechodu na Labview 8.2. byl s instalací koupen i podprogram *PID regulátor*. V definitivní verzi softwaru jsem pak hlavně z důvodu bezpečnosti použil profesionální řešení. Pole vypočtených akčních veličin pro serva je pomocí úlohy *anal\_out* zapsáno na analogové výstupy a přes obvody napěťově-proudových převodníků ovládá přímo servoventily jednotlivých hydromotorů. Konstanty regulace jsou získány z globální proměnné *PID gains*, kam je zapsala aplikace *pl\_user*. Ve spolupráci s touto smyčkou pracuje i generace žádaných hodnot. Jak bylo zdůvodněno v kapitole 2.3.2, jsou žádané hodnoty zásadně čteny ze souboru, nikdy se negenerují v reálném čase. Aby nebylo ohroženo časování smyčky přístupem na pevný disk, bylo čtení hodnot z disku svěřeno paralelně běžící aplikaci *pl\_user*. Spolupráce obou aplikací je ve žlutě podbarvené části smyčky. Data a informace se mezi oběma aplikacemi přenáší pomocí globálních proměnných. První z nich je logická proměnná *generace*. Hodnota *False* znamená, že je plošina v klidu. Ten se dosáhne tak, že *pl\_reg* v tomto případě jako žádanou hodnotu používá neustále stejnou hodnotu. Jestliže operátor pomocí aplikace *pl\_user* dá povel ke spuštění pohybu, tato nadřazená aplikace zavolá podprogram *pl\_read*. Ten přečte ze zvoleného souboru prvních 100 hodnot, pole uloží do globální proměnné *data* a nastaví proměnnou *generace* na *True*. To je signál pro aplikaci *pl\_reg*. Ta přesune pole žádaných hodnot z globální proměnné *data* do svého registru (standardní *shift registr* smyčky *Timed loop*). Z tohoto registru pak postupně vyčítá hodnoty a používá je pro regulaci. Tento stav je právě zobrazen na obrázku 49. O ukončeném přesunu dat informuje v logické proměnné *read* a aplikace *pl\_read*, přečte dalších 100 hodnot ze



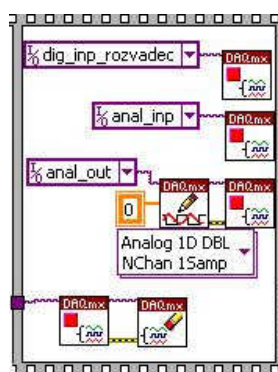
souboru a uloží je opět do proměnné *data*. Jakmile regulační smyčka dojdou data v shift registru, přesune si další dávku žádaných hodnot z proměnné *data*. Instrukce přesunu dat jsou v jiné vrstvě struktury *case* a na obrázku 49 nejsou tedy vidět. Proto jsem je zobrazil samostatně na dalším obrázku 52.



Obr. 52 Instrukce přesunu dat z globální proměnné *data*

Přesun dat se projevuje prodloužením doby trvání instrukcí ve smyčce – to jsou ty špičky v grafu časování smyčky na obrázku 48. Na obrázku 52 je vidět i další globální proměnná *enddata*, kterou nastaví *pl\_read* na *True*, když už přečetl celý soubor žádaných hodnot. V tom případě pak regulační smyčka po vyprázdnění shift registru nepřesouvá další data, ale přestaví proměnnou *generace* zpět na *False* a jako žádanou hodnotu dále používá konstantu rovnou poslední přečtené hodnotě. Plošina tedy zůstane stát v poslední poloze přečtené ze souboru.

Tím je popis aplikace *pl\_reg* prakticky vyčerpán. Zbývá poslední část sekvence, následující po ukončení smyčky *Timed loop*. Sem se však program dostane pouze v okamžiku ukončování činnosti celé aplikace a funkce je tedy jasná – ukončit činnost všech běžících úloh. Tyto zakončovací operace jsou na obrázku 53.



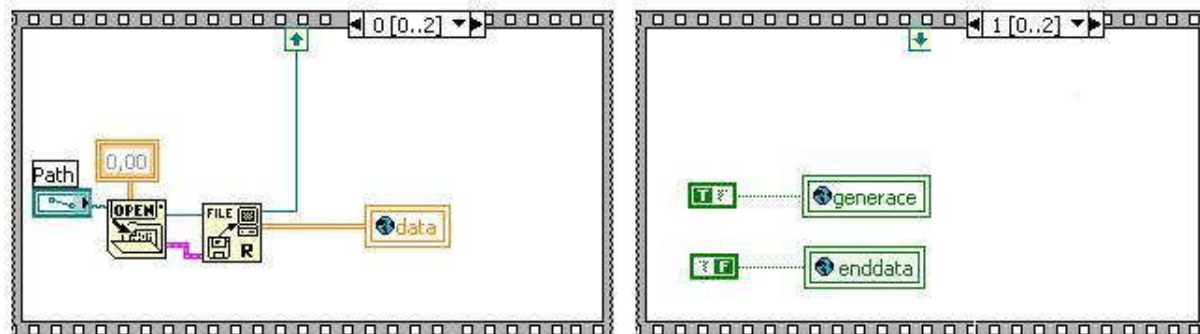
Obr. 53 Ukončení běžících úloh v závěru aplikace *pl\_user*

### 3.2.6. Podprogram *pl\_read*

Tento podprogram patří aplikaci *pl\_user*, která ho užívá vždy, když potřebuje vyvolat pohyb plošiny. Protože byl zmíněn v předchozím textu a při pohybu plošiny běží vlastně paralelně s aplikací regulace, zasluhuje si vlastní kapitolku. Při jeho programování bylo totiž potřeba vytvořit bezkolizní běh dvou aplikací, z nichž jedna (*pl\_reg*) je kritická na pravidelnost běhu. Ani tato aplikace se však nemůže libovolně „courat“ protože musí stíhat dodávat data ze souboru do globální proměnné. Aplikace je opět tvořena sekvencí. V úvodní části se provede již výše popsání akce – přečte se prvních 100 hodnot ze zvoleného souboru, uloží se do



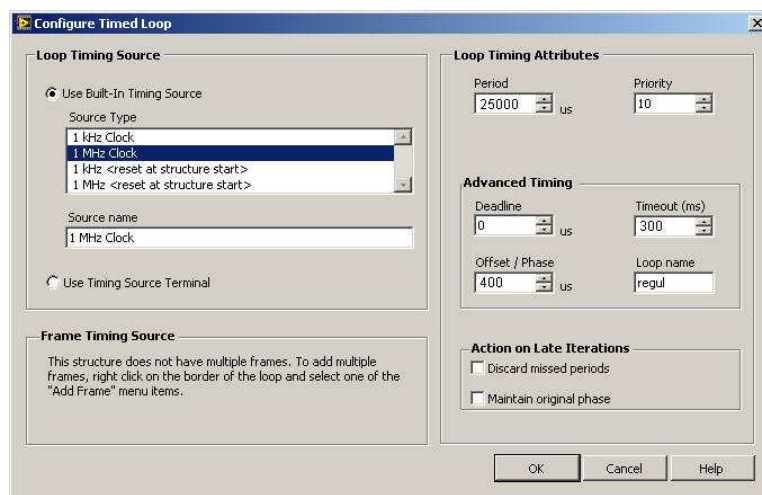
globální proměnné *data* a pak se zápisem *True* do proměnné *generace* dá pokyn aplikaci *pl\_reg* aby zahájila pohyb plošiny. Tyto část sekvence je vidět na obrázku 54.



Obr. 54 Úvodní části sekvence v aplikaci *pl\_read*

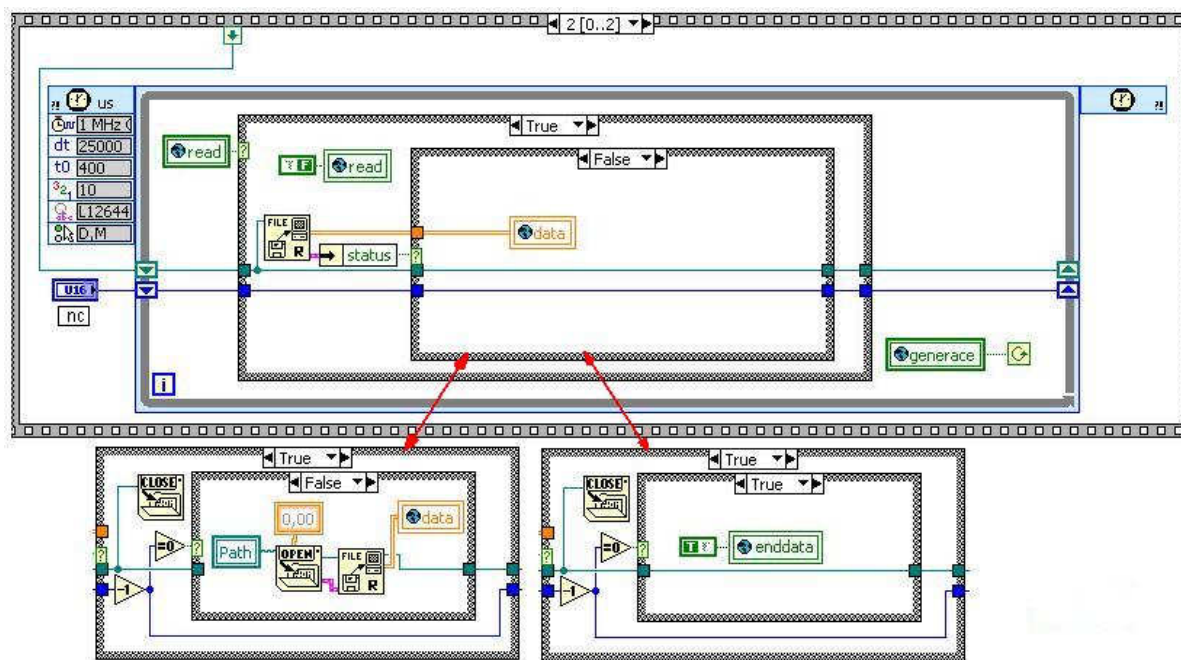
Nyní je třeba vysvětlit, proč se data čtou v blocích zrovna po stovkách. Sto hodnot představuje při periodě regulace 1ms čas jedné desetiny sekundy. Z disku se tedy čte 10x za sekundu. Mým původním záměrem bylo čtení mnohem delšího bloku. Praktické zkoušky však ukázaly, že zvětšující se velikost pole prodlužuje podstatně čas přesunu dat do a z globální proměnné *data*. Tím nebezpečně narůstala doba potřebná k vykonání přesunu dat (špičky v grafu na obrázku 48) a při cca tisíci vzorcích již bylo ohroženo časování smyčky aplikace *pl\_reg*. Hodnota 100 vzorků je tedy výsledkem mnoha pokusů a je to kompromis mezi délkou datového pole a pomalejším krokem čtení dat z disku, který umožňuje vyrovnat eventuelní nerovnoměrnosti v přístupu na disk. Extrémem by bylo čtení jedné hodnoty každou milisekundu, ale zde by časování celé regulační smyčky bylo již závislé na pravidelnosti přečtení dat z disku.

V další části sekvence již běží opět hardwarově časovaná smyčka *Timed loop*, která zajišťuje další pravidelné čtení dat až do konce souboru. Protože v této chvíli je aktivní i smyčka v aplikaci *pl\_reg*, běží obě smyčky paralelně. Z toho vychází i časování, které je zobrazeno na obrázku 55.



Obr. 55 Časování smyčky aplikace *pl\_read*

Opět jsou využity systémové hodiny 1MHz a časování smyčky je nastaveno na 25 ms. Start jsem navíc posunul offsetem o 400  $\mu$ s. Pokud tedy v čase „t“ má dojít ke spuštění obou smyček, spustí se nejprve smyčka regulace (ta má offset rovný nule). Vykonání jejích instrukcí trvá převážně méně než 300  $\mu$ s a pak teprve ve čtyřsté mikrosekundě dojde ke startu smyčky čtení. Její instrukce se tedy vykonávají v době, kdy regulační smyčka už „nic nedělá“ a jen čeká na uplynutí časového intervalu pro další spuštění. Tím se obě smyčky (i když běží současně) vlastně střídají ve využití kapacity systému. Provedení smyčky je na obrázku 56.

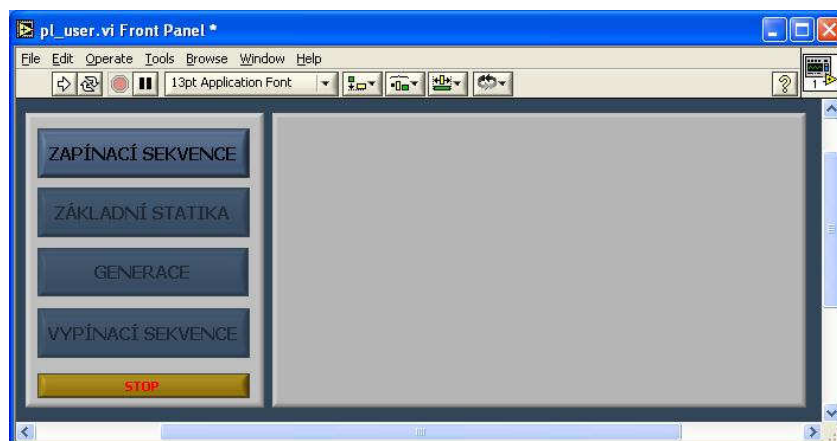


**Obr. 56 Smyčka Timed loop aplikace pl\_read**

Když regulační smyčka přesune data z proměnné *data* do svého registru, nastaví proměnnou *read* na *True*. Tím se v této smyčce provedou příkazy zobrazené v horní části obrázku 56, tedy přečte pole dat ze souboru a zapíše do proměnné *data*. Zároveň se proměnná *read* vrací na *False*. Tím další průchody touto smyčkou nevykonávají nic a čtení dalšího bloku dat se provede až v okamžiku, kdy regulační smyčka přebere data a proměnnou *read* opět nastaví na *True*. Aplikace *pl\_user* umožňuje volit vícenásobné opakování celého souboru. Počet opakování je nastaven v proměnné *nc*. Pokud se tedy přečtou všechna data ze souboru, dekrementuje se proměnná *nc*. Není-li výsledkem nula, soubor se otevře znovu od začátku a celý cyklus se opakuje. Tato situace je zobrazena vlevo dole na obrázku 56. Pokud je výsledkem nula, jde o skutečný konec pohybu. Do proměnné *enddata* se uloží *True* jako příznak pro regulační smyčku. Ta po dočerpání dat ukončí pohyb a nastaví proměnnou *generate* na *False*. To je signál i pro zakončení smyčky v podprogramu *pl\_read* a celý podprogram končí.

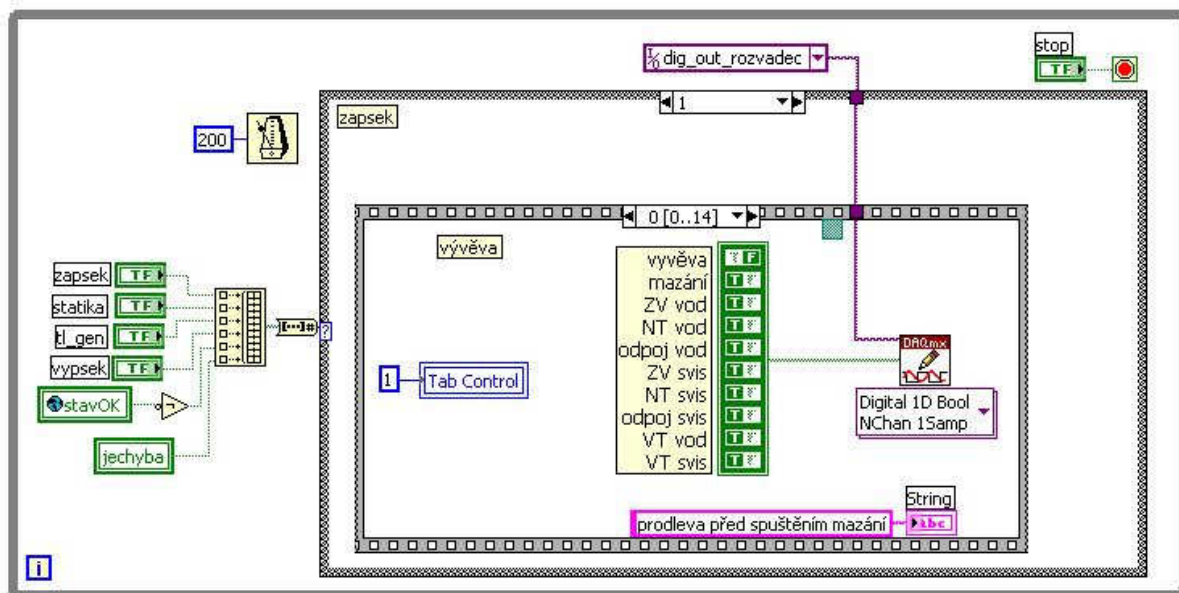
### 3.2.7. Aplikace pl\_user

Tato aplikace zastřešuje celou činnost zařízení a slouží pro ovládání funkcí plošiny operátorem. Úvodní čelní panel aplikace je zobrazen na obrázku 57.



**Obr. 57 Čelní panel aplikace pl\_user**

Aplikace běží opět na real-time systému, ale její čelní panel je zobrazován na operátorském PC. Datový přenos je mizivý, přenáší se jen informace o kliknutí na ovládací tlačítka, proto je tento princip použitelný a nemusí se užívat síťově sdílené proměnné. Z čelního panelu jsou zřejmé čtyři základní funkce, které aplikace plní. Zapínací sekvence automatizuje zapnutí celého zařízení, kdy je potřeba dodržet daný postup zapínání jednotlivých systémů plošiny. Aby tuto činnost nemusel provádět operátor podle nějakého manuálu, je v aplikaci naprogramována přesná sekvence zapnutí, kterou operátor spustí jediným tlačítkem. Obdobnou funkci má vypínací sekvence při ukončování činnosti zařízení. Pomocí základní statiky lze ručně nastavovat různé polohy plošiny, hlavně pro účely ověření krajních (eventuelně kolizních) poloh. Ty mohou vznikat mezi táhly od horních třech hydromotorů a namontovaným testovaným dílem při velkých rozměrech dílu a velkých úhlech naklopení plošiny. Poslední funkcí je generace, která slouží k vlastnímu pohybu plošiny dle datových souborů. Okno v pravé části čelního panelu se využívá pro zadávání a zobrazování upřesňujících informací pro jednotlivé činnosti a jeho vzhled se mění podle akce, která právě probíhá. Vnitřní struktura aplikace odpovídá přesně členění do těchto čtyřech základních funkcí. Základem je klasická smyčka *While*. V ní se na začátku testuje stisknutí některého z tlačítek v levé části panelu. Funkce tlačítek je vzájemně blokována, aby nemohlo dojít k nesmyslné činnosti (na začátku je například tedy aktivní jen tlačítko zapínací sekvence, protože ostatní funkce při vypnuté plošině nemají smysl). Dále následuje struktura *case*, jejíž jednotlivé vrstvy odpovídají funkčním tlačítkům. Aplikace využívá úlohu *dig\_out\_rozvadec* pro zápis logických hodnot do karty PXI 6528. Funkce aplikace může být ovlivněna i výskytem havarijních situací. Informace se do aplikace přenáší pomocí globálních proměnných z aplikace *pl\_reg*, která čte stav bezpečnostního systému. Havarijní situaci řeší další vrstva struktury *case* a smyslem je uvedení všech výstupních relé do výchozího stavu, aby při novém zapínání nedošlo k neočekávaným stavům výstupů. Základní struktura aplikace je na obrázku 58.



**Obr. 58** Struktura aplikace *pl\_user*

Na tomto obrázku je zároveň vidět i první úroveň struktury *case*, ve které jsou instrukce pro vykonání zapínací sekvence. Tyto instrukce jsou uspořádány do *Staked sekvence*, čímž je zajištěno jejich vykonávání v potřebném pořadí. Obdobně jsou strukturovány i ostatní vrstvy *case*. Protože použité *Staked sekvence* jsou velmi obsáhlé (např. startovací sekvence má 15 kroků) nebudu je uvádět formou detailního popisu struktury v block diagramu, ale popíši jejich činnost pomocí vývojových diagramů.

## ZAPÍNACÍ SEKVENCE

Funkce automatizuje úkony spojené s uvedením plošiny do chodu. Operátor je tak oproštěn o nutnost pamatovat si (nebo odněkud číst) přesný postup úkonů, které je třeba vykonat pro bezproblémové uvedení zařízení do chodu.



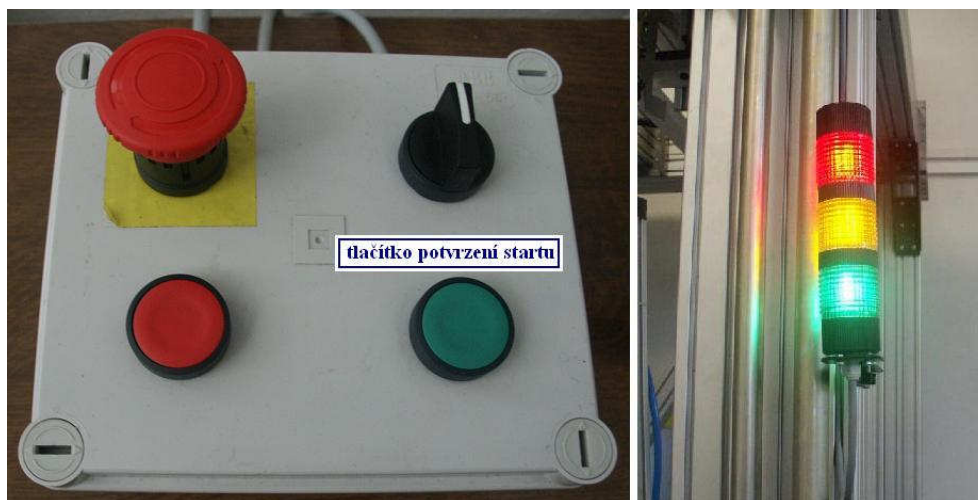
Nejprve se zapne motor odsávání průsakového oleje a pak ventil mazání. Poté software čeká na hardwarové potvrzení startu. To je pojistka proti náhodnému spuštění systému, protože v následující části zapínací sekvence už totiž dojde k zapnutí přívodu tlaku a pohybu plošiny. Tato akce může být nebezpečná pro osoby přítomné v prostoru experimentu a proto je započetí této činnosti blokováno stlačením reálného tlačítka operátorem. K uvedení plošiny do provozu tedy nestačí jen kliknutí myši na virtuální tlačítko na monitoru, ale je třeba stlačit



skutečné tlačítko na ovládací skřínce. Stlačení tlačítka je zpracováno bezpečnostním systémem, informaci následně přečte smyčka *pl\_reg* a uloží do globální proměnné. Odtud ji vyčte aplikace *pl\_user* a na jejím základě rozhodne o pokračování zapínací sekvence. Důležité je právě to zpracování informace o stlačení tlačítka bezpečnostním systémem. I kdyby totiž došlo k nějakému nepochopitelnému selhání softwaru a ten tuto čekací smyčku přeskočil, bezpečnostní systém nedovolí zapnout přívodní ventily tlaku bez stlačení tohoto tlačítka. Tím je spuštění plošiny paralelně jištěno a je vyloučen její náhodný start chybou softwaru nebo nechtěným kliknutím na tlačítko **ZAPÍNACÍ SEKVENCE**. Nyní budu pokračovat v popisu vývojového diagramu.

Po potvrzení startu se změří aktuální poloha a ta se dosadí jako výchozí žádaná hodnota. Tím se minimalizuje regulační odchylka a servoventily hydromotorů jsou prakticky zavřeny. Díky tomu po zapnutí hydraulického tlaku nedojde ke skokovému pohybu (trhnutí) pístnic. Pak se vypočte nájezdová rampa, tedy trajektorie pohybu všech pístnic ze současné polohy do výchozí (střední) polohy a trajektorie se uloží do souboru (důsledně se dodržuje zásada negenerovat žádané hodnoty v reálném čase). Výpočet trajektorie zajišťuje podprogram *pl\_rampa*, který bude popsán dále. Na signalizačním semaforu se rozsvítí červená. Norma totiž požaduje signalizaci stavu zařízení, aby osoby přítomné v prostoru experimentu jednoznačně věděly, kdy se mohou po prostoru bezpečně pohybovat. Proto je na plošině umístěn signalizační semafor. Zelená znamená, že zařízení je vypnuto, bez tlaku, v žádném případě nemůže dojít k pohybu. Do prostoru lze libovolně vstupovat, provádět montážní práce na testovaném zařízení. Žluté světlo značí zapnuté zařízení, které je činností regulačních obvodů drženo v klidové poloze bez pohybu. Do prostoru lze vstupovat se zvýšenou opatrností a jen po určených trasách. Tento stav se používá pro „nastoupení a vystoupení“ testované osoby. Konečně červené světlo znamená zákaz vstupu, zařízení se pohybuje.

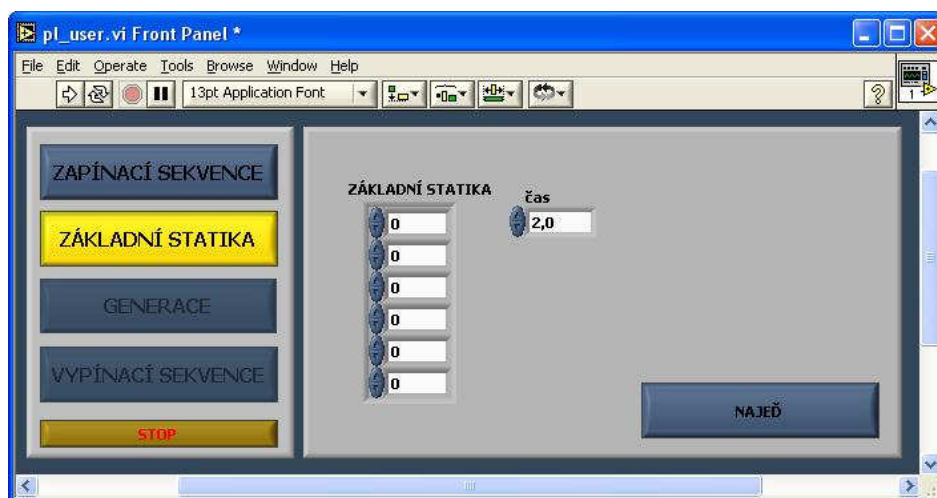
Následuje zavření zkratovacích ventilů v napajecích a odpojovacích ventilů na motorech a po časové prodlevě se zapne nízký tlak. Pak se zavolá podprogram *pl\_read* (jeho funkce byla popsána v minulé kapitole), který jako soubor žádaných hodnot použije vypočtenou rampu a plošina najede do výchozí – střední polohy. Pak se zapnou ventily vysokého tlaku. Plošina stojí ve výchozí poloze, na semaforu se tedy rozsvítí žlutá – zařízení pod tlakem, ale v klidu. Tím zapínací sekvence končí, aplikace *pl\_user* pak na čelním panelu zpřístupní tlačítka dalších funkcí a naopak zablokuje tlačítko pro zapínací sekvenci. Na následujícím obrázku 59 je vlevo tlačítko potvrzení startu na ovládací skřínce operátora a vpravo signalizační semafor na plošině (ve stavu „kontrola funkce“ – proto svítí všechny barvy).



**Obr. 59 Tlačítko potvrzení startu a signalizační semafor**

## ZÁKLADNÍ STATIKA

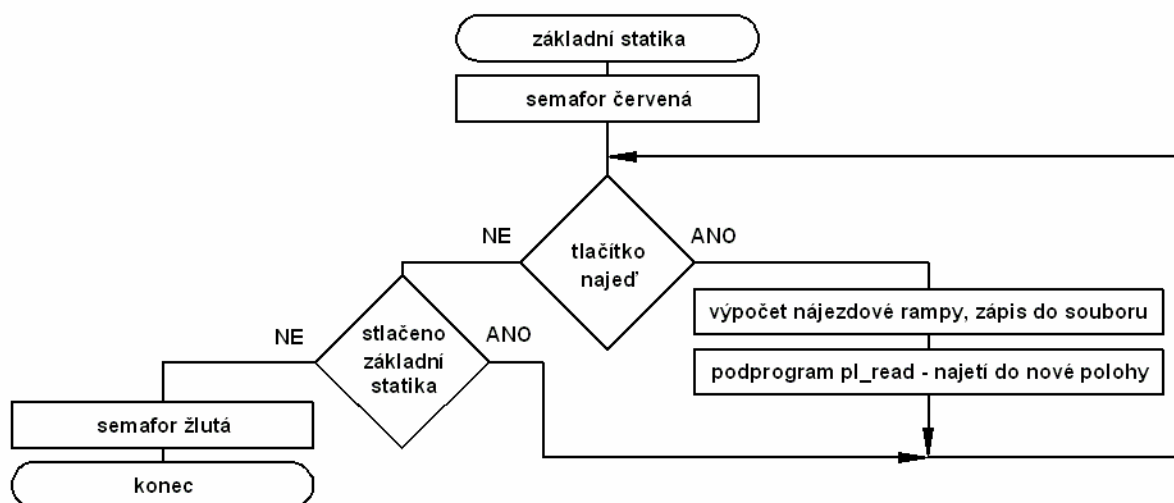
Z obrázku čelního panelu aplikace při základní statice je možno okamžitě odvodit smysl této funkce – ruční najíždění do různých poloh.



Obr. 60 Panel Základní statika

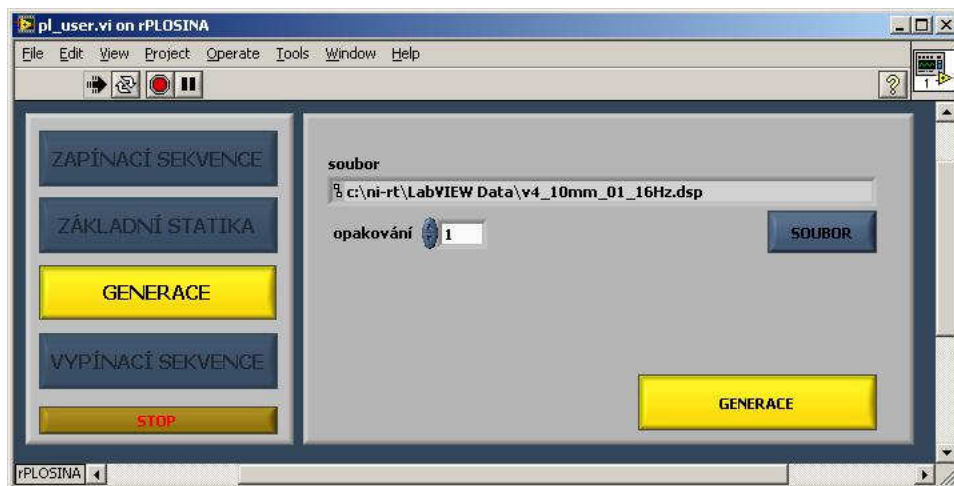
Funkce se spustí stlačením tlačítka *ZÁKLADNÍ STATIKA* na čelním panelu. Zde je třeba udělat malou odbočku. Tlačítka v Labview mohou mít různé „mechanické“ vlastnosti. První z nich po kliknutí myši zůstanou stlačená a do původní polohy se vrací až opětovným kliknutím – takto je nastaveno i tlačítko *ZÁKLADNÍ STATIKA*. Druhou možností je, že tlačítko na kliknutí reaguje jen mžikovým stlačením a automaticky se vrací do výchozí polohy poté, co je jeho stav přečten programem. Takto je nastaveno tlačítko *NAJEĎ*. Tím je zajištěno, že program reaguje na jedno kliknutí na takové tlačítko jen jednou. A nyní zpět k popisu funkce. Operátor může nastavit polohy jednotlivých motorů a čas přejezdu ze současné do nové polohy. Po kliknutí na *NAJEĎ* plošina najede do nové polohy, kde se zastaví. Takto lze najíždět postupně do různých poloh, vždy se zadají polohy a čas a klikne se na *NAJEĎ*. Funkce se ukončí „vypnutím“ tlačítka *ZÁKLADNÍ STATIKA* kliknutím myši.

Pro realizaci přejezdu je využit stejný princip jako při najíždění v zapínací sekvenci, tedy výpočet rampy podprogramem *pl\_rampa*, uložení dat do souboru a následné zavolání podprogramu *pl\_read*, který zrealizuje vlastní pohyb. Na závěr popisu ještě uvedu vývojový diagram, který názorně shrne výše popsanou činnost.



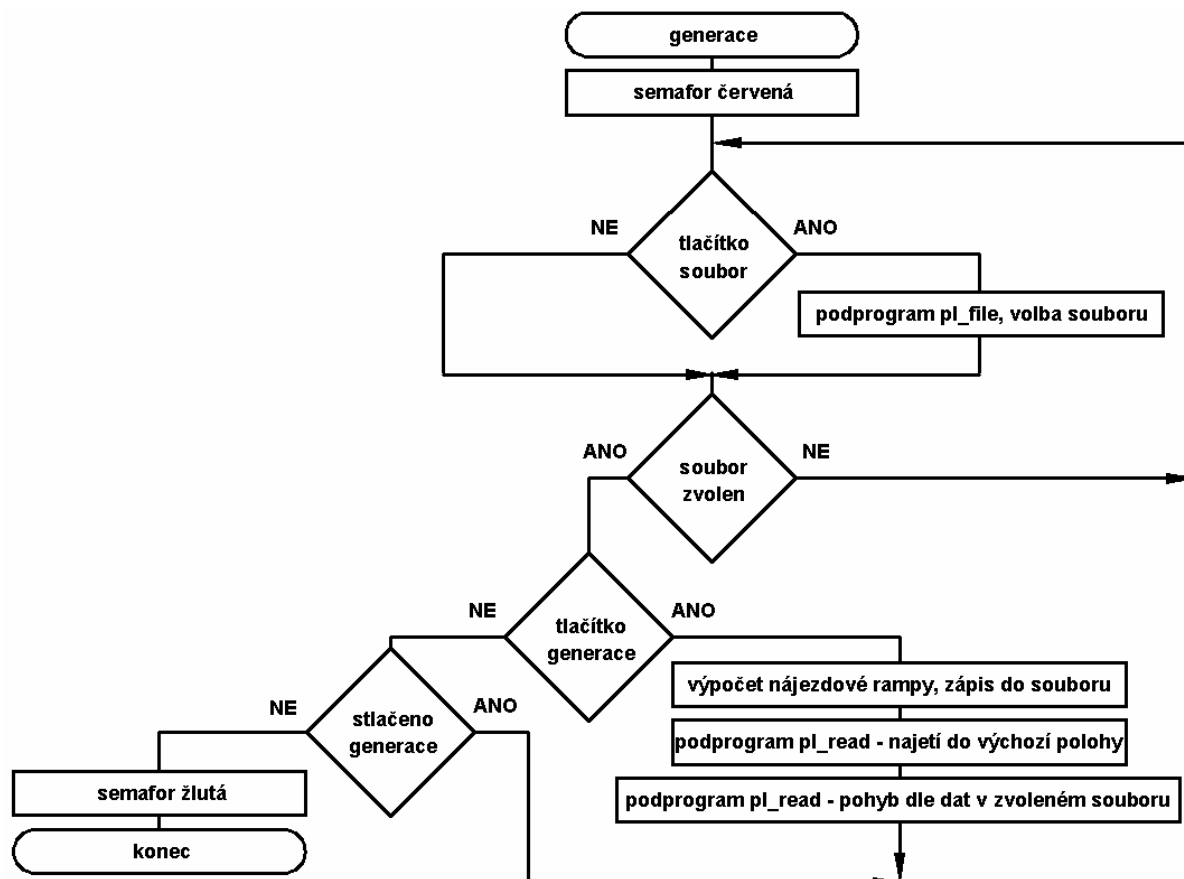
## GENERACE

Tato funkce je stěžejní, slouží k vykonávání pohybů plošiny. Jak už bylo řečeno dříve, žádný z pohybů není generován v reálném čase. I funkce *GENERACE* pochopitelně dodržuje tuto zásadu a operátor tak může pouze zvolit jméno zdrojového souboru a počet opakování. Čelní panel této funkce je na obrázku 61.



Obr. 61 Panel Generace

Funkce je velmi podobná předchozí *ZÁKLADNÍ STATICE*. Na čelním panelu je místo pole pro ruční zadání hodnot možnost volby zdrojového souboru. Do dialogu pro výběr souborů se operátor dostane kliknutím na tlačítko *SOUBOR*, dále lze nastavit počet opakování souboru. Vlastní pohyb se spustí po kliknutí na tlačítko *GENERACE*. Struktura programu je na následujícím diagramu.



Při tvorbě této funkce jsem narazil na zajímavý problém. Jak již bylo uvedeno dříve, aplikace *pl\_user* běží na real-time systému a její čelní panel se zobrazuje na operátorském PC. Zdrojové soubory s daty žádaných hodnot jsou pochopitelně také uloženy na disku real\_time systému. Pro práci se soubory Labview disponuje funkcemi, které zobrazují klasické dialogové panely pro procházení adresářové struktury, volbu jména souboru apod., které jsou shodné s panely zobrazovanými v produktech Microsoftu. Tyto funkce nejspíše přímo využívají nějaké knihovny operačního systému Windows, takže po instalaci aplikace na real\_time systém prostě bez varování přestanou fungovat, protože real-time operační systém pochopitelně žádné knihovny Windows neobsahuje. Programátor se tak dostane do poněkud svízelné situace, pokud potřebuje nějak se soubory pracovat. I pro tak jednoduchý úkon, jako je výběr souboru pro čtení dat, je nutno stvořit vlastní aplikaci. Přiznávám, že mě toto, u jinak dle mého názoru dokonalého Labview, hodně překvapilo. Z tohoto důvodu jsem byl nucen vytvořit podprogram *pl\_file*, který je volán pro výběr souboru s daty žádaných hodnot. Podprogram bude dále popsán samostatně, nyní ho uvažujme jako celek, který umožňuje operátorovi zvolit soubor pro generaci. Na začátku se právě volá výše zmíněný podprogram pro volbu souboru. Po kontrole, zda byl nějaký soubor vybrán, lze spustit vlastní generaci. Protože pohyby pístnic v datovém souboru nemusí obecně vycházet z nulové polohy (stačí například fázově posunuté sinusovky), mohlo by dojít na začátku generace ke skokové změně polohy pístnic. Proto se ještě před startem generace přečte ze souboru první hodnota a spočte se přejezdová rampa mezi aktuální polohou a výchozí polohou v souboru. Do ní pak plošina najede shodným způsobem jako u základní statiky. Ihned vzápětí se spustí vlastní pohyb opětovným zavoláním podprogramu *pl\_read*, který však jako podklad pro pohyb nedostane soubor s rampou, ale vybraný zdrojový soubor a počet opakování. Tento podprogram se postará o celou generaci včetně eventuálního opakování a teprve po jeho skončení se řízení vrací funkci *GENERACE* v aplikaci *pl\_user*.

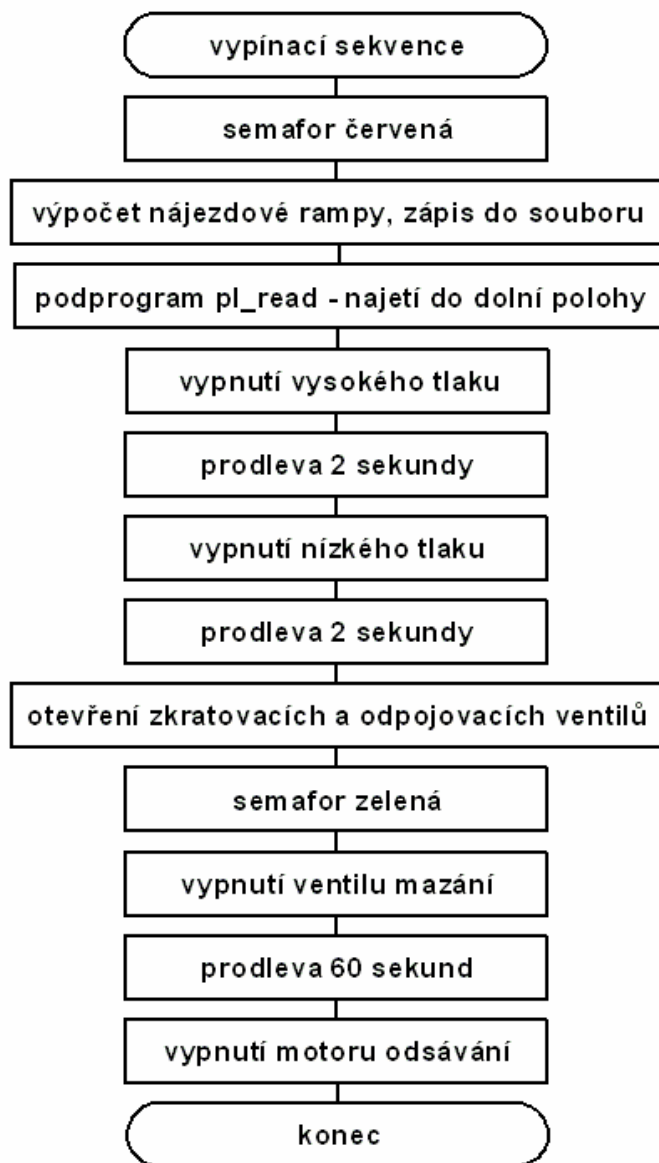
Na závěr ještě poznámka. Když například potřebujeme 10 minut generovat sinusovku, nemusíme mít 10 minut „dlouhý“ zdrojový soubor, ale stačí desetkrát opakovat „minutový“ soubor. Z tohoto důvodu při opakování souboru následuje po přečtení poslední hodnoty okamžitý skok zpět na začátek souboru a čtení znovu od začátku, aby nebylo narušeno časování. Během provozu není tedy nijak kontrolována „návaznost“ signálu z konce na začátek souboru. Pokud signál nenavazuje velikostí nebo fází, dojde ke skoku v poloze nebo rychlosti. Korektnost souborů pro opakování může operátor zkontrolovat předem pomocí aplikace *pr\_monitor*.

## VYPÍNACÍ SEKVENCE

Tato funkce automatizuje úkony potřebné k vypnutí plošiny. Zde je opět potřeba dodržet správný sled úkonů, aby plošina byla korektně vypnuta. Tato funkce tyto úkony opět automatizuje, aby jejich provedení jejich sledu nezáleželo na operátorovi. Je to opět sekvence jednotlivých příkazů. Zde již není žádné hardwarové potvrzení, funkce se vykoná okamžitě po kliknutí na tlačítko **VYPÍNACÍ SEKVENCE**. Po vypnutí hydraulické energie je potřeba počítat s tím, že plošina vlastní vahou sjede do nejnižší polohy. Aby se minimalizoval tento nekoordinovaný pohyb na minimum, vypínací sekvence nejprve s plošinou sjede do minimální dolní polohy a pak teprve vypne hydraulické ventily. Zde je nutné poznamenat, že minimální poloha do které může plošina řízeně sjet je -70mm. Do konce zdvihu pístnic sice zbývá ještě 30mm, ale právě v této poloze reaguje bezpečnostní systém. Do nižší polohy tedy nelze řízeně jet, bezpečnostní systém by okamžitě reagoval vypnutím tlaku. Proto se pohyb zastaví právě v této poloze a dojde k vypnutí tlaku. Zbylých 30mm pak plošina sjede neřízeně vlastní vahou. Protože však předtím plošina stojí, je tento pohyb poměrně pomalý a dopad je navíc zatlumen instalovaným tlumícím systémem. Ve sledu instrukcí se pak vypíná ventil mazání a následuje prodleva, kdy ještě pracuje odsávací čerpadlo, aby se odčerpal všechny

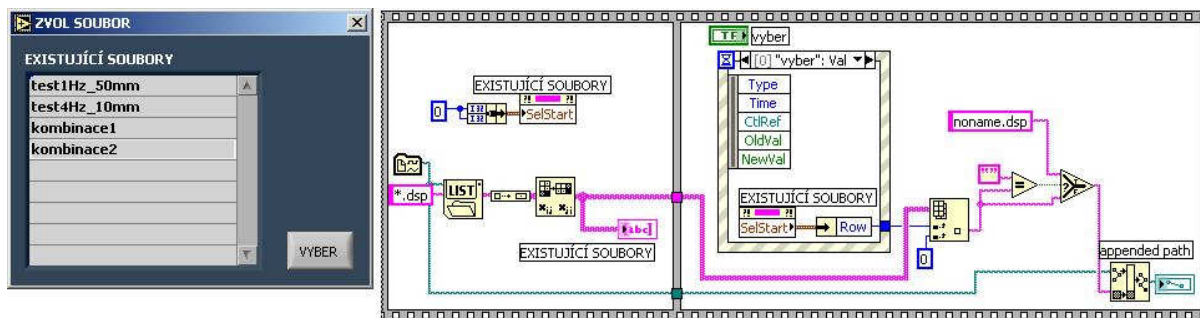


průsakový olej. Pak se zařízení kompletně vypne. Pro úplnost i zde uvádím vývojový diagram této funkce.



### 3.2.8. Podprogram pl\_file

Jak jsem již uvedl v minulé kapitole, na real\_time operačním systému neběží standardní funkce Labview pro práci se soubory. Proto jsem byl nucen nějak vyřešit problém s výběrem souboru pro generaci. Abych nemusel vytvářet zbytečně složitý program, rozhodl jsem se pro kompromisní řešení. To spočívá v tom, že soubory s daty žádaných hodnot budou uloženy v jednom konkrétním adresáři na disku real-time systému. Program tedy nebude muset řešit průchod adresářovou strukturou, ale nabídne k výběru jen soubory z jednoho konkrétního adresáře. Tím se celé řešení podstatně zjednoduší. Podprogram je volán z aplikace *pl\_user*, běží na real-time systému a jeho čelní panel je zobrazován na monitoru operátorského PC. Čelní panel a struktura je na obrázku 62.

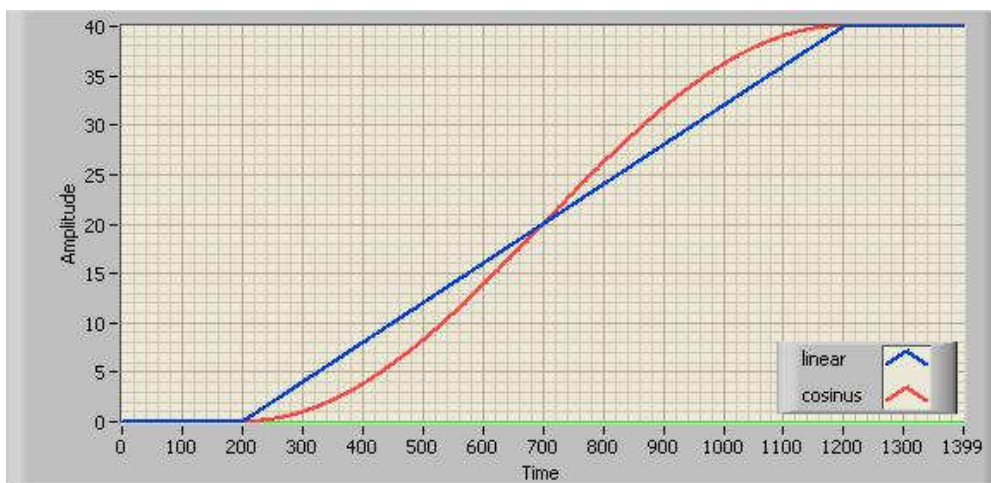


### Obr. 62 Podprogram pl\_file

Podprogram vypíše jména souborů z předdefinovaného adresáře do tabulky na čelním panelu. Operátor kliknutím myši označí jeden z nich. Software pak v *Event structure* čeká na událost – kliknutí na tlačítko *VYBER*. Následně se z implicitního adresáře a jména souboru sestaví kompletní cesta k souboru a ta se při ukončení podprogramu předá volající aplikaci. V případě, že operátor neoznačí žádný ze souborů a klikne na *VYBER*, dosadí se do cesty jméno „noname“. To je informace pro volající aplikaci, že nebyl vybrán žádný soubor a není tedy možné spustit generaci.

### 3.2.9. Podprogram pl rampa

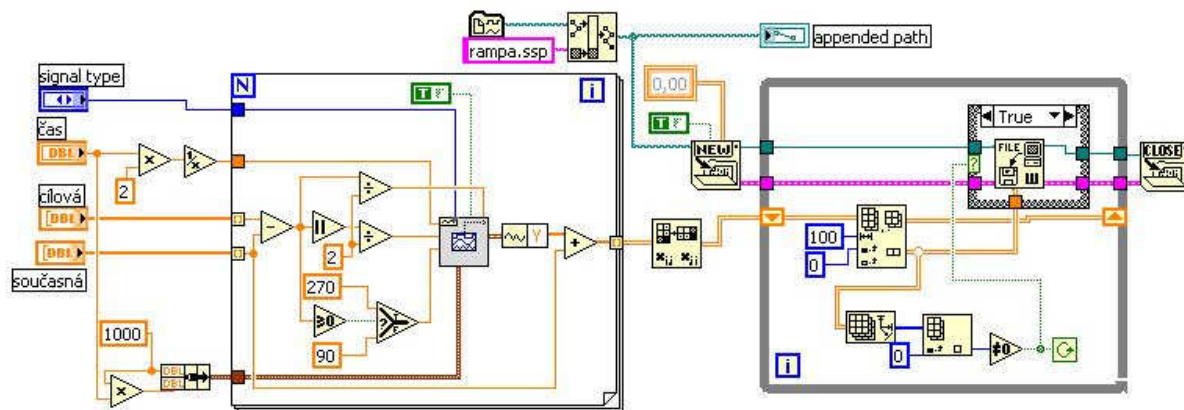
Aplikace *pl\_user* potřebuje pro své funkce realizovat přejezd plošiny z jedné statické polohy do druhé. Protože pohyb plošiny se realizuje standardně čtením dat ze souboru, je takto ošetřen i přejezd mezi polohami. Podprogram z výchozí a koncové polohy a zadaného času vypočte trajektorie pohybu pístnic jednotlivých motorů. Výsledky zapíše do souboru se standardně nastaveným jménem. Ten se pak použije pro generaci pohybu – přejezdu z jedné polohy do druhé. V původní variantě podprogramu byla počítána lineární rampa. Při tomto postupu však vzniká skok rychlosti na začátku a konci pohybu, což způsobuje špičky zrychlení. V případě kratších přejezdových dob, přesahovaly špičky zrychlení povolenou mez a reagoval na ně bezpečnostní systém. Z tohoto důvodu byla lineární rampa nahrazena „cosinovou“ rampou - pro přejezd mezi polohami se generuje rampa ve tvaru goniometrické funkce cosinus. Rozdíl mezi oběma rampami je na obrázku 63.



### Obr. 63 Přejezdové rampy

Na obrázku je vidět plynulý rozjezd a brzdění při použití „cosinové“ rampy. Podprogram umožňuje přepínat mezi oběma rampami (tato možnost se však v současné verzi programu nepoužívá, nadřazený *pl\_user* volá vždy „cosinovou“ rampu). Vlastní podprogram je rozdělen v podstatě na dvě části. V první se postupně v cyklu pro všechny motory pomocí standardního generátoru labview vygenerují přejezdové rampy a výsledek se uloží do dvourozměrného pole. V druhé části se toto pole „porcuje“ na intervaly po 100 hodnotách a takto ukládá do

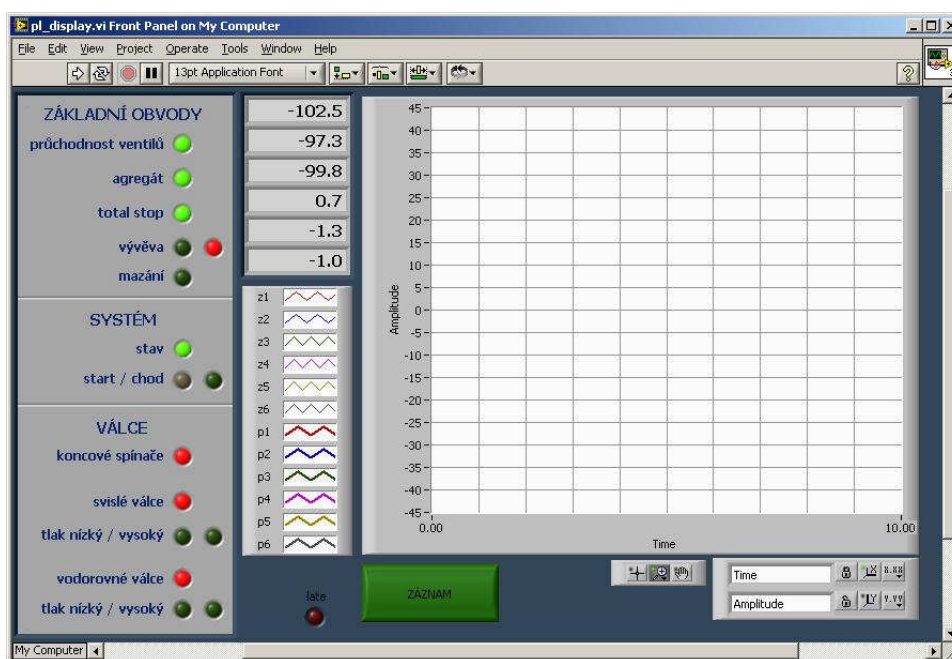
souboru. Uložení po těchto blocích je důležité pro následující čtení při generaci, protože jedna operace *read* přečte ze souboru automaticky právě jeden uložený blok. Tím je zajištěno jednoduché čtení dat v potřebné dávce (viz. kapitola 3.2.6). Struktura podprogramu je na obrázku 64.



Obr. 64 Struktura podprogramu pl\_rampa

### 3.2.10. Aplikace pl\_display

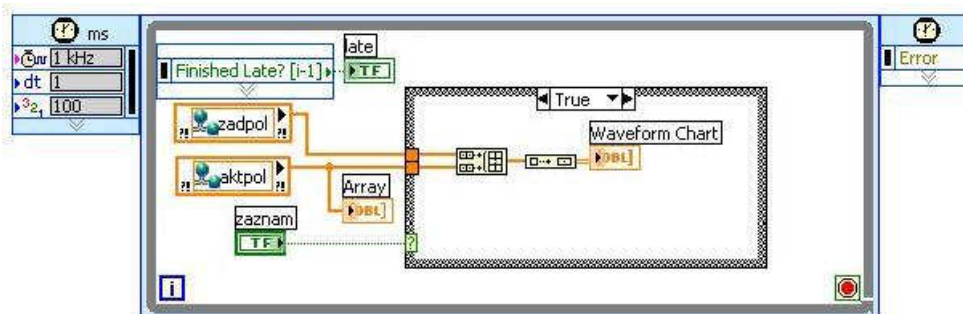
Toto je poslední z aplikací, které běží při provozu zařízení. Je kompletně umístěna na operátorském PC a slouží ke zobrazování informací o systému. Veškeré informace čerpá ze síťově sdílených proměnných, kam je ukládá aplikace *pl\_reg*. Norma předepisuje informovanost operátora o stavu zařízení. První informací na čelním panelu této aplikace je proto „kopie“ kontrolky ze silového rozvaděče, které informují o stavu jednotlivých výkonových obvodů. Protože pole reálných kontrolky je obsluhováno bezpečnostním systémem, bude jejich význam popsán až v kapitole o bezpečnostním systému. Nyní postačí fakt, že stav všech obvodů je paralelně čten i aplikací *pl\_reg* a uložen do síťové proměnné *saf\_stat*. V pravé části panelu je pak číselná informace o aktuální poloze pístnic a v grafu může operátor vidět i jejich časový průběh spolu s žádanými hodnotami. Panel aplikace je vidět na obrázku 65.



Obr. 65 Čelní panel aplikace pl\_display



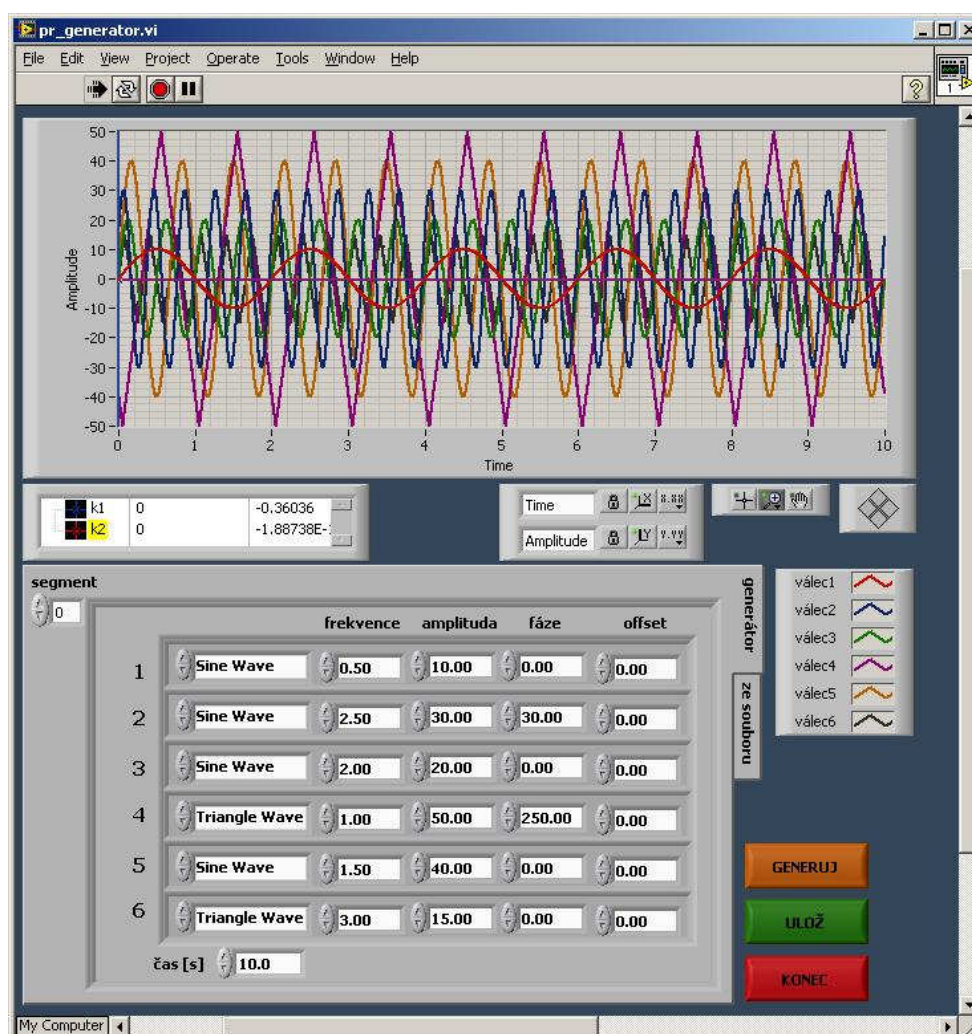
Struktura aplikace je velmi primitivní a je vidět na obrázku 66. Využívá opět hardwarově časovanou smyčku, i když na PC již jsou k dispozici jen hodiny s kmitočtem 1kHz. Smyčka je časována na 1ms, aby stihla číst data ze síťových proměnných, které aktualizuje aplikace pl\_reg právě v tomto kmitočtu. Uvnitř smyčky se pouze přečtou síťové proměnné a zobrazí na panel kontrolky a číselné pole aktuálních hodnot. Při stisknutí tlačítka „ZÁZNAM“ jsou data zobrazována i v grafu.



Obr. 66 Struktura aplikace pl\_display

### 3.2.11. Aplikace pr\_generator

Je první z „přípravných“ aplikací, nepodílí se tedy přímo na řízení plošiny. Jejím smyslem je generování datových souborů pro řízení plošiny. Čelní panel je na obrázku 67.

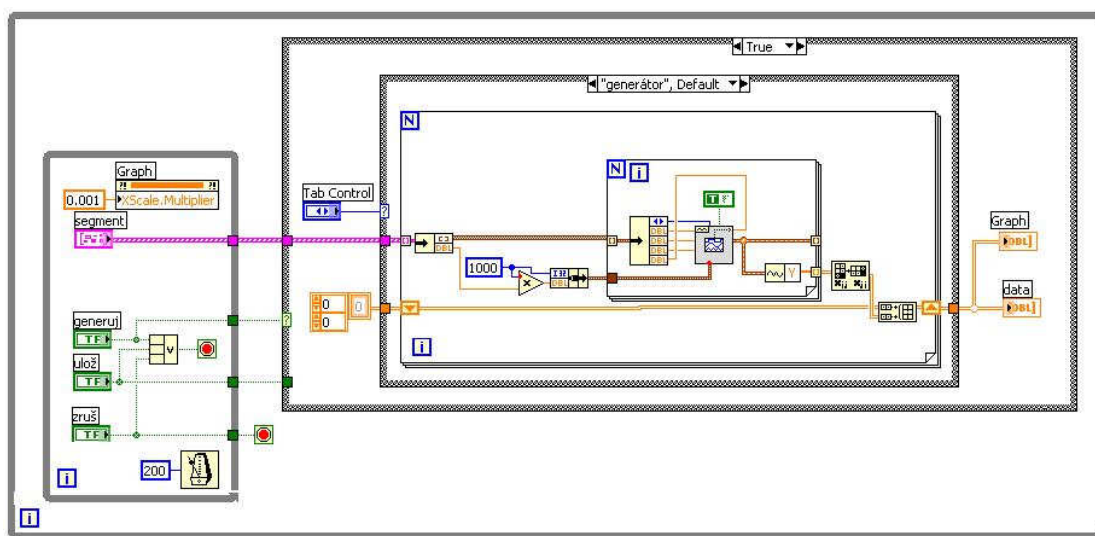


Obr. 67 Čelní panel aplikace pr\_generator



Datový soubor se dá generovat dvěma způsoby. První je skutečný generátor, kde se dá pro jednotlivé motory vygenerovat kombinace základních harmonických signálů – sinusovky, trojúhelníku a obdélníku. Signál pro řízení lze poskládat z posloupnosti libovolného počtu segmentů. Každý ze segmentů má definovanou délku a pro jednotlivé motory se v něm definuje tvar signálu, amplituda, frekvence, offset a fázový posun. Pole pro zadání těchto hodnot v segmentu je na záložce „*generátor*“ a je vidět vlevo dole na obrázku 67. Po zadání hodnot ve všech segmentech se kliknutím na tlačítko *GENERUJ* vypočtou průběhy žádaných hodnot pro jednotlivé motory a výsledek se zobrazí do grafu, aby mohl být zkontrolován. Generátor nijak nekontroluje návaznost signálů mezi jednotlivými segmenty. Pokud na sebe signál v následujících segmentech nenavazuje (například vlivem různého fázového posuvu nebo offsetu), dojde při použití takového signálu k řízení ke skokové změně polohy. Vhodnost signálu lze právě proto kontrolovat opticky v grafu, pokud signál nevyhovuje, lze upravit parametry a generovat znovu. Pokud operátor shledá signál vhodným, uloží ho do souboru kliknutím na *ULOŽ*. Takováto funkčnost se může jevit poměrně primitivní, ale zde je třeba konstatovat, že tento generátor byl vytvořen jen jako pomocný, pro testovací účely. Takto se v praxi plošina pochopitelně neřídí. Při reálném použití plošiny je většinou zadána prostorová trajektorie nějakého bodu na testovaném dílu a plošina kombinací pohybů jednotlivých motorů má dosáhnout této trajektorie. K tomu je pochopitelně nutné transformovat zadaný pohyb bodu do pohybu jednotlivých pístnic. Autoři mechanické části plošiny mají vytvořen kinematický model celého zařízení a pomocí něho dokáží právě tuto transformaci provést. Jejich výstupem je soubor s časovým průběhem žádaných poloh jednotlivých motorů, jejichž kombinace realizuje výsledný požadovaný pohyb. Druhou funkcí aplikace *pr\_generátor* je tedy zpracování tohoto souboru. Jde v podstatě jen o změnu formátu souboru. Výstupem z kinematického modelu je soubor ASCII, pro generaci žádaných hodnot se používá binární soubor, který je navíc rozdělen do stomilisekundových bloků (viz kapitola 3.2.6). Tato funkce generátoru je na druhé záložce „*ze souboru*“ a její princip je prostý. Nejprve operátor zvolí soubor se zdrojovými daty a průběhy se poté zobrazí v grafu. Kliknutím na *ULOŽ* se po zvolení jména souboru data uloží již v potřebném formátu.

Vnitřní struktura aplikace je poměrně jednoduchá. V první části se buď generují data opět pomocí standardního signálového generátoru Labview nebo se načtou data z ASCII souboru. Data se zobrazí v grafu. V druhé části se při ukládání data opět „porcují“ po stomilisekundových blocích. Diagram aplikace je na obrázku 68.

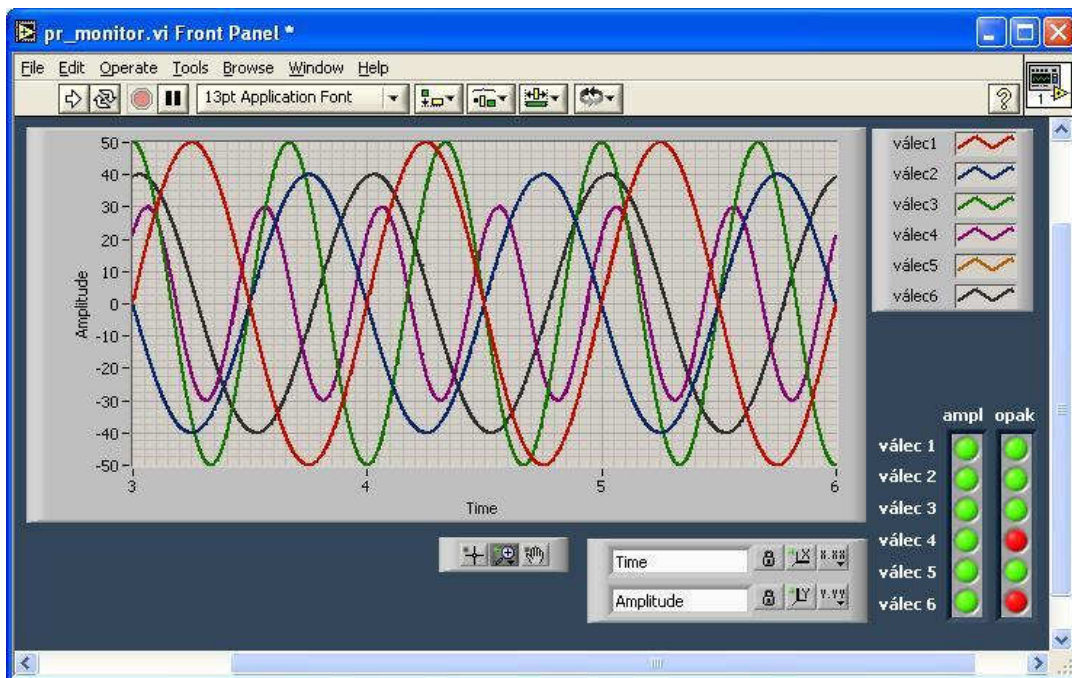


**Obr. 68 Struktura aplikace *pr\_generátor***

Na obrázku je vidět část s generátorem, ostatní vrstvy nemá velký smysl zobrazovat. Čtení z ASCII souboru je triviální záležitost, zápis do binárního souboru po blocích je totožný se zápisem v podprogramu *pl\_rampa* a lze ho vidět v pravé části obrázku 64.

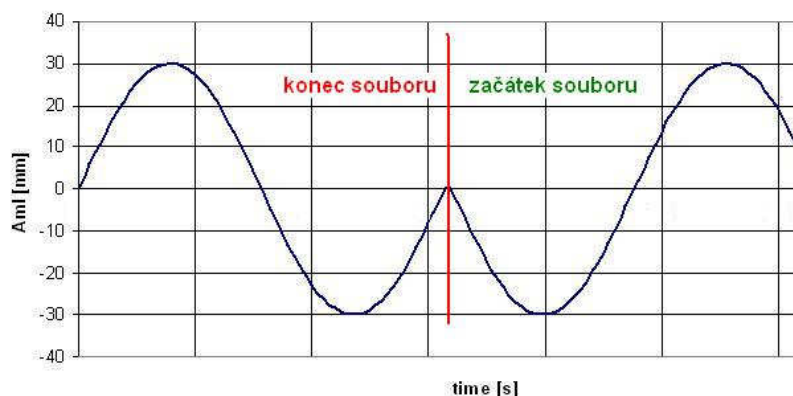
### 3.2.12. Aplikace pr\_monitor

Je poslední aplikací celého programového balíku, který jsem vytvořil pro práci s plošinou. Je opět velmi jednoduchá a jedinou její funkcí je kontrolní zobrazení binárních souborů žádaných hodnot do grafu. Panel aplikace je na obrázku 69.



Obr. 69 Panel aplikace pr\_monitor

Operátor může opticky zkontrolovat průběh signálů z již hotových uložených souborů. Mimo to aplikace automaticky provádí dvě kontroly. První z nich je kontrola překročení maximálních mezí polohy jednotlivých motorů – ta byla vzhledem k možnostem kulových kloubů stanovena na  $\pm 70\text{mm}$ . Rozsvícením červené kontrolky aplikace upozorní na signál, který tuto podmínku nesplňuje. Druhá kontrola se týká návaznosti signálů z konce a začátku souboru, která je důležitá, pokud se soubor použije při generaci opakovaně. Zde se kontroluje první a poslední hodnota v souboru. Rozdíl obou hodnot musí ležet v pevně nastavené toleranci  $0,5\text{mm}$ . Tato kontrola ovšem nepostačuje. Signály totiž mohou navazovat amplitudou, ale nemusí navazovat fází. V tomto případě by nedošlo ke skoku v poloze, ale v rychlosti, což ve svém důsledku vyjde prakticky nastejno. Příklad takového signálu je na obrázku 70.



Obr. 70 Příklad signálu se skokem rychlosti

Z tohoto důvodu se ještě provádí kontrola znaménka první derivace signálu z prvního a posledního stomilisekundového bloku v souboru. Výsledek kontroly je opět zobrazen polem zelených nebo červených kontrolky na panelu aplikace. Se signály by se dala pochopitelně

provádět celá další řada kontrol, ale praxe je zatím nepotřebuje a proto jsem se s nimi ani nezabýval. Tato kontrola slouží jen pro odhalení nejhorších chyb, které by pravděpodobně způsobily reakci bezpečnostního systému – překročení amplitudy vždy, u skoku v poloze nebo rychlosti jen pokud je v činnosti hlídání zrychlení a pak pochopitelně i podle jejich velikosti (hlídání zrychlení lze vypnout pro testy bez člověka). Přípustnost signálu pro testy s člověkem tato kontrola neodhalí a ani odhalit nemůže. V této fázi jsou k dispozici jen signály pro jednotlivé motory, které mohou jednotlivě normu splňovat, ale výsledný pohyb plošiny vyvolaný jejich kombinací již nikoliv. To je velký rozdíl oproti jednoosému buzení, kdy signál motoru odpovídá i konečnému buzení testovaného dílu. Kontrola přípustnosti signálů pro testy s člověkem se tedy v tomto případě musí provádět na skutečném složeném pohybu a byla proto zabudována do softwaru, který řeší přepočty žádané trajektorie bodu do pohybu šesti motorů. Tuto problematiku ale řešili členové vývojového týmu zabývající se mechanikou a kinematikou plošiny a proto nebude v mojí práci popsána.

### **3.2.13. Závěrečné shrnutí softwarového vybavení**

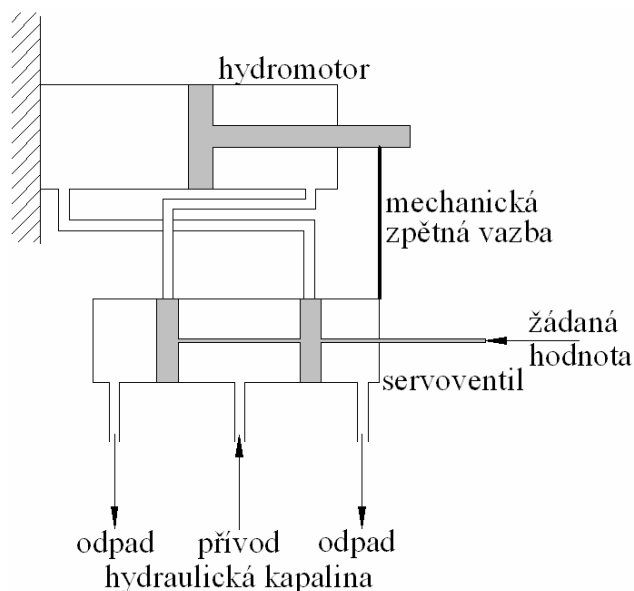
Zkušenosti z praktického provozu ukázaly, že se mi v programovacím prostředí Labview 8.2. podařilo stvořit funkční real-timeovou aplikaci, která splňuje všechna kritéria na ní kladená a zařízení proto spolehlivě pracuje. Při její tvorbě jsem uplatnil své dosavadní zkušenosti z programování jiných aplikací v Labview, ale pochopitelně jsem se neobešel bez studia nových funkcí a postupů z dostupných materiálů National Instruments. Během popisu softwaru jsem průběžně na tuto literaturu neodkazoval, protože její používání bylo komplexní po celou dobu tvorby softwaru. Manuály k novým verzím Labview se již nevydávají v papírové podobě, jsou vesměs přístupné ke stažení na stránkách [www.ni.com](http://www.ni.com). Konkrétní použité zdroje jsou v přehledu literatury uvedeny pod čísly 16 až 18. Další informace o hardwarových prostředcích byly čerpány z již dříve uvedené literatury pod čísly 6 až 9.

### 3.3. OPTIMALIZACE VLASTNOSTÍ ŘÍDÍČÍHO SYSTÉMU

V předchozích kapitolách je popsán návrh a praktická realizace řídicího systému a to jak hardwarové, tak softwarové části. Hlavním úkolem řídicího systému je pochopitelně polohová regulace šesti lineárních hydromotorů. Ta je tvořena klasickým zpětnovazebním obvodem s regulátorem PID, který je realizován softwarovým modulem. Aby mohlo zařízení spolehlivě pracovat, bylo nutné optimalizovat nastavení regulátorů. Tato optimalizace proběhla ve dvou etapách. V první jsem se snažil pomocí matematického modelu určit alespoň základní nastavení regulačních parametrů. V druhé etapě jsem pak výsledky aplikoval na reálnou soustavu a následovalo doladění nastavení regulačních konstant metodou měření přechodových charakteristik - odezev na reálný skok vstupního signálu, tj. reálně dosažitelnou dobu Heavisideova skoku. Po tomto naladění pak následovalo ověření skutečně dosahovaných parametrů zařízení. Jako nejvhodnější se mi jevilo stanovení frekvenčních charakteristik celého zařízení. Posledním ověřením funkčnosti pak bylo sledování přesnosti vykonání reálně předepsané trajektorie pohybu.

#### 3.3.1. Teorie hydraulického servomechanismu

Základem hydraulického servomechanismu je hydromotor. Ten může být buď rotační nebo lineární. Protože jsou na plošině se šesti stupni volnosti použity motory lineární, bude se další rozbor zabírat pouze tímto typem motoru. K vyvození vlastního pohybu pístu motoru je potřeba vyvodit průtok hydraulické kapaliny motorem. K tomu je potřeba zdroj této kapaliny a regulační prvek, který řídí velikost a směr průtoku kapaliny. Tento prvek se nazývá servoventil a je nedílnou součástí hydraulického servomechanismu. Aby byly dosaženy co nejlepší dynamické vlastnosti, mělo by být propojení servoventilu s motorem co nejkratší a bez pružných členů (hadic) – v praxi je servoventil často montován přímo na tělo motoru. Nejjednodušší hydraulický servomechanismus s mechanickou zpětnou vazbou vypadá následovně:



**Obr. 71 Princip hydraulického servomechanismu**

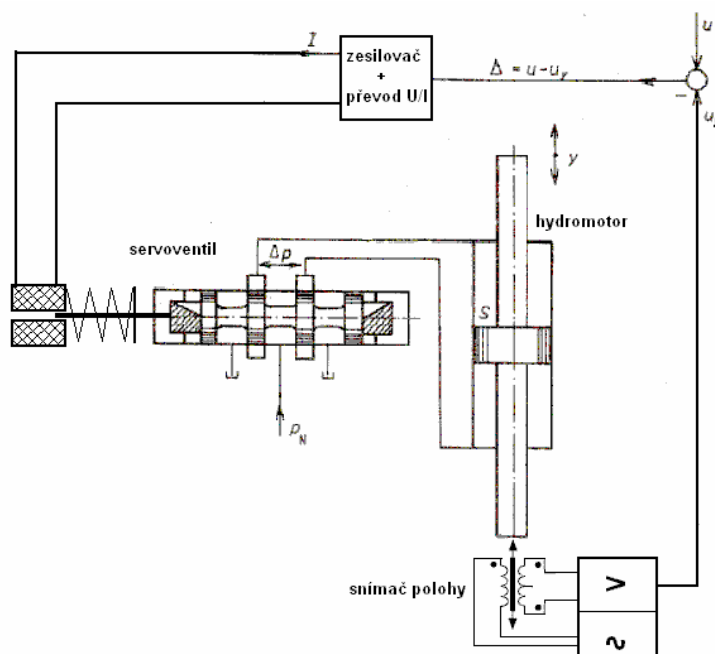
Posune-li žádaná hodnota šoupátkem servoventilu např. ve směru šipky, propojí se přívod kapaliny na pravou a odpad na levou stranu pístu hydromotoru a píst se začne posouvat směrem doleva. Přes mechanickou zpětnou vazbu pohyb pístu pohybuje současně i tělem servoventilu, tím se průtok opět uzavře a hydromotor se zastaví v nové poloze. Tato „sestava“ by v praxi asi příliš nefungovala, pohyb těla servoventilu je značně nepraktický – vyžadoval



by pružné přívody kapaliny a řešení mechanické zpětné vazby je také složité. Dají se na něm však ukázat základní vlastnosti celého systému:

Servoventil řídí průtok (tedy množství kapaliny dodané za čas) a tomu je úměrná nikoliv poloha, ale rychlost pohybu pístu hydromotoru. Z hlediska regulace polohy pístu se tedy lineární hydromotor chová jako integrační člen. Druhou podstatnou věcí ovlivňující chování celého systému je provedení šoupátka servoventilu. Tak jak je naznačeno na obrázku, by celý systém vykazoval necitlivost na malé změny žádané hodnoty, protože šířka pístů šoupátka servoventilu je větší než šířka kanálů vedoucích k motoru. Ideální stav je pochopitelně přesná shoda šířky pístu a kanálu, což je ovšem v praxi nedosažitelná podmínka. I při velmi přesné výrobě dojde časem k opotřebení hran šoupátka a tím i k trvalým průsakům kapaliny přes servoventil. To je zvláště nepříjemné vzhledem k následujícímu hydromotoru - „integrátoru“. Klidová poloha pístu může být dosažena jen trvalou činností zpětnovazební regulace, při jakékoliv poruše dojde k nedefinovanému pohybu pístu hydromotoru až do jeho krajní polohy.

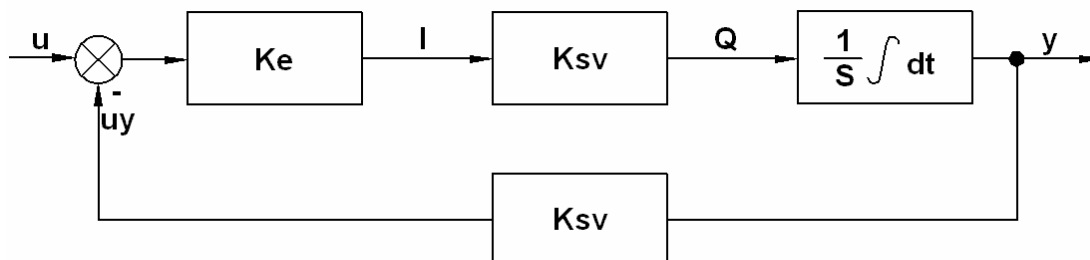
Abychom se zbavili nevýhod mechanické zpětné vazby polohy, používá se v praxi nejčastěji zpětná vazba elektrická. V motoru musí tedy přibýt snímač polohy, který převede polohu na elektrický signál a v servoventilu elektrický pohon šoupátka. Schéma takového obvodu je na následujícím obrázku:



**Obr. 72 Elektrohydraulický servomechanismus**

Hydraulický válec je doplněn snímačem polohy (nejčastěji v provedení LVDT), který je v praxi často vestavěn dovnitř dutého pístu motoru. Jeho signál je upraven, zesílen a odečtením od žádané hodnoty je vytvořena regulační odchylka. Servoventil má stejnou úlohu jako u mechanické vazby na obrázku 71, tedy převést regulační odchylku na průtok kapaliny motorem. K posuvu šoupátka servoventilu se nejčastěji používá systém elektromagnet - pružina. Velikost síly elektromagnetu překonávající pružinu šoupátka je úměrná proudu protékajícímu cívkou magnetu, proto musí být regulační odchylka převedena na proud. Protože k přímému posuvu šoupátka je vzhledem k velkým pracovním tlakům v hydraulickém obvodu potřeba velké síly, byl by přímý posuv šoupátka zaplacen robustní cívkou magnetu a velkými proudy (v řádech jednotek Ampérů). Proto se v praxi používá systém, který k posuvu šoupátka využívá tlakovou hydraulickou kapalinu a bude popsán později. Na principu se ale ani pak nic nemění, poloha šoupátka a tím i průtok servoventilem je úměrný proudu

protékajícímu elektromagnetem. Pouze velikost proudu se sníží do řádů mA – typicky 40mA na plné otevření servoventilu. Blokové schéma předchozího zapojení je tedy následující:



Charakteristiky jednotlivých částí obvodu jsou zde prozatím linearizovány a nahrazeny jednou konstantou:  $K_e$  – zesilovač regulační odchylky,  $K_{sv}$  – servoventil,  $K_s$  – zesilovač zpětné vazby a hydromotor zatím opět jako jednoduchý integrační člen ( $S$  je plocha pístu).

Z tohoto schématu lze odvodit nejjednodušší možnou rovnici popisující elektrohydraulický servomechanismus

$$y = \frac{1}{S} \int (u - k_s y) k_e k_{sv} dt \quad (3.3.1-1)$$

což je diferenciální rovnice prvního řádu. Shrňme-li součin všech konstant do jedné

$$\tau = \frac{S}{k_e k_{sv} k_s} \quad (3.3.1-2)$$

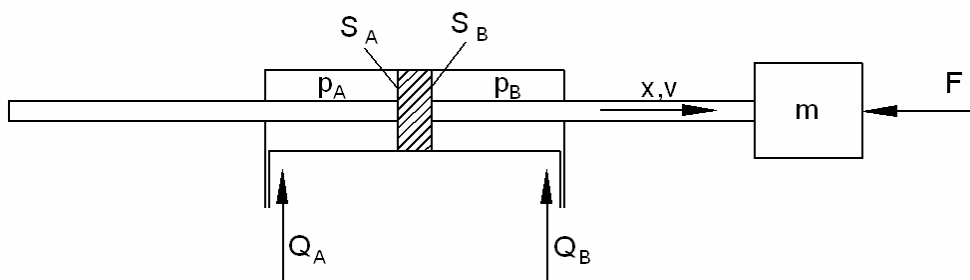
můžeme rovnici vyjádřit ve tvaru

$$\tau y' + y = \frac{1}{k_s} u \quad (3.3.1-3)$$

Z tohoto tvaru je patrné, že statické zesílení (v klidu – tedy derivace je nulová) závisí nepřímo úměrně na zesílení zpětné vazby, nikoliv na zesíleních v přímé větvi. Dynamické vlastnosti jsou dány časovou konstantou  $\tau$  u první derivace a ta závisí na všech členech regulačního obvodu.

Skutečný hydraulický servomechanismus pracující s reálnými prvky se musí vypořádat s jejich konkrétními vlastnostmi. To není problém u „elektrických“ částí obvodu, které jsou tvořeny standardními prvky a jejich parametry (zesílení, přenos,...) se dají nastavit tak, že jejich eventuelní nedokonalosti jsou řádově menší než u „mechanických“ částí – tedy hydromotoru a servoventilu. Problematika reálných hydraulických prvků je popsána například v literatuře Elektrohydraulické servomechanismy [19] nebo Optimalizace průmyslových regulačních obvodů [20].

Popis vlastností reálného přímočarého hydromotoru vychází z následujícího schématického znázornění motoru:



**Obr. 73 Schématické znázornění lineárního hydromotoru**

kde  $p$  = tlak,  $Q$  = průtok kapaliny,  $S$  = plocha pístu,  $x$  = poloha pístu,  $v$  = rychlost pístu,  $m$  = hmotnost,  $F$  = vnější síla, indexy A a B odlišují prostor vlevo a vpravo od pístu.

Pro takovýto motor lze sestavit pohybovou rovnici

$$m\ddot{x} + b\dot{x} = S_A p_A - S_B p_B - F - F_T \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (3.3.1-4)$$

kde  $F_T$  = třecí síla,  $b$  = součinitel tlumení

a rovnice pro průtoky do pracovních prostorů motoru

$$Q_A = S_A v + C_A \frac{dp_A}{dt} + Q_{LA} + Q_L \quad (3.3.1-5)$$

$$Q_B = S_B v - C_B \frac{dp_B}{dt} - Q_{LB} + Q_L \quad (3.3.1-6)$$

kde  $C_x$  jsou hydraulické kapacity a

$Q_L = G_I (p_A - p_B)$  je průsakový průtok vlivem svodové propustnosti  $G_I$

$Q_{LA} = G_{\text{ext}} p_A$  a totéž pro stranu B je ztrátový průtok přes těsnění pístnice.

Za předpokladu, že plocha pístu je na straně A i B shodná, lze zavést za zjednodušujícího předpokladu, že i ztrátové průtoky jsou shodné, rovnost  $Q = Q_A = Q_B$ . Pak pro střední polohu pístu lze Laplaceovou transformací z rovnic 3.3.1-5 a 3.3.1-6 získat obraz rozdílu tlaků

$$P_A(s) - P_B(s) = \frac{Q(s) - S \cdot sX(s)}{\frac{V_0}{2K} \cdot s + G_I} \quad (3.3.1-7)$$

kde  $V_0$  = objem pracovních prostorů včetně připojovacího vedení.

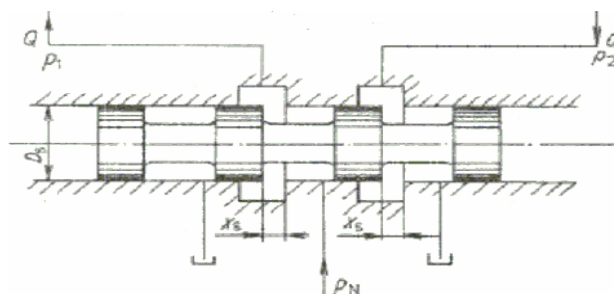
Dosadíme-li vztah 3.3.1-7 do Laplaceova obrazu pohybové rovnice 3.3.1-4 dostaneme po úpravě obraz polohy pístnice v závislosti na průtoku a zatěžující síle

$$X(s) = \frac{\frac{S}{G_I b + S^2} \left[ Q(s) - \frac{F(s)}{S} \left( \frac{V_0}{2K} s + G_I \right) \right]}{s \left[ \frac{mV_0}{2K(G_I b + S^2)} s^2 + \frac{V_0 b + 2KmG_I}{2K(G_I b + S^2)} \cdot s + 1 \right]} \quad (3.3.1-8)$$

Z této rovnice lze pak odvodit přenos řízení reálného hydromotoru jako

$$G_{Qx}(s) = \frac{X(s)}{Q(s)} \quad (3.3.1-9)$$

Popis reálného servoventilu je ještě obtížnější. Základní popis vychází z následujícího principiálního schématu servoventilu.



**Obr. 74 Schématické znázornění šoupátka servoventilu**

Pro průtok kapaliny do navazujícího hydromotrou  $Q$  lze psát rovnici

$$Q = \pi \cdot D_s \cdot x_s \cdot \alpha \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_N - p_1)} = \pi \cdot D_s \cdot x_s \cdot \alpha \sqrt{\frac{2}{\rho} p_2} \quad (3.3.1-10)$$

kde  $\alpha$  = průtokový součinitel,  $\rho$  = hustota kapaliny a ostatní symboly jsou patrné z obrázku.

Už tato úvodní rovnice však představuje zjednodušení oproti reálnému stavu. První zjednodušující předpoklad je rovnost průtoku do a z následujícího motoru – zanedbává tedy možné ztráty průsaky přes vnější těsnění motoru. Druhým zjednodušením je předpoklad nulového tlaku na výstupu do odpadu. To ale v praxi také nebývá, olej většinou ze servoventilu nevytéká na podlahu, ale vrací se potrubím zpět do nádrže čerpadla. Potrubí představuje hydraulický odpor, který pochopitelně vyvolává tlakový spád. Pro další odvození ale předpokládejme, že je tento tlak zanedbatelný vůči pracovnímu tlaku  $p_N$ .

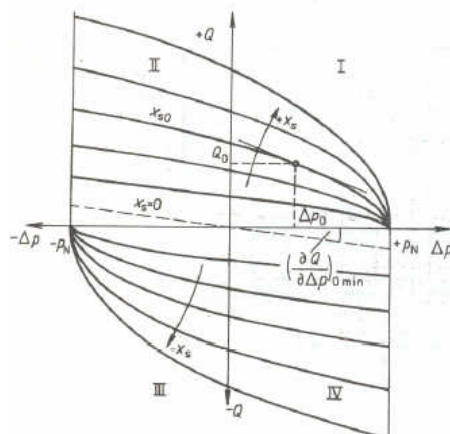
Předpokládejme tedy, že

$$p_N = p_1 + p_2 \quad \Delta p = p_1 - p_2 \quad (3.3.1-11)$$

a pro průtok pak tedy bude platit

$$Q = \frac{\pi \cdot D_s \cdot \alpha}{\sqrt{\rho}} \cdot x_s \sqrt{p_N - \Delta p} \quad (3.3.1-12)$$

Tento nelineární vztah je možno zobrazit jako soustavu křivek  $Q = f(\Delta p)$ , kde otevření šoupátka  $x_s$  je parametrem. Dostaneme soustavu parabol – pole zatěžovacích charakteristik.



**Obr. 75 Příklad průtokových zatěžovacích charakteristik**

Vztah (3.3.1-12) navíc selhává ve střední poloze šoupátka. Pokud by v této poloze platilo, že  $Q = 0$ , nebyl by se vztahem žádný problém. U reálného servoventilu by to představovalo nulové krytí hran šoupátka, což je ale prakticky nemožné. Buď existuje servoventil s překrytím nebo nedokrytím hran. Vzhledem k tomu, že u plošiny jsou servoventily s nedokrytím, budu se zabývat pouze touto variantou.

Zavedme nejprve součinitel  $a$ , který zahrne geometrické vlastnosti šoupátka a vlastnosti kapaliny

$$a = \frac{\pi \cdot D_s \cdot \alpha}{\sqrt{\rho}} \quad (3.3.1-13)$$

a dále předpokládejme, že připojený hydromotor je odlehčen a pracuje bez tření. Z těchto předpokladů plyne

$$\Delta p = 0 \text{ a tedy } p = p_1 = p_2 = \frac{p_N}{2} \text{ a } Q = Q_1 = Q_2 \quad (3.3.1-14)$$



Pro zdvih uvnitř nedokrytí, tedy pro  $x_s < x_0$  platí

$$Q_1 = a\sqrt{2} \cdot (x_0 + x_s) \cdot \sqrt{p_N - p} - a\sqrt{2} \cdot (x_0 - x_s) \cdot \sqrt{p} \quad (3.3.1-15)$$

$$Q_2 = a\sqrt{2} \cdot (x_0 + x_s) \cdot \sqrt{p} - a\sqrt{2} \cdot (x_0 - x_s) \cdot \sqrt{p_N - p} \quad (3.3.1-16)$$

takže rovnice průtokové charakteristiky má tvar

$$Q = 2 \cdot a \cdot x_s \cdot \sqrt{p_N} \quad (3.3.1-17)$$

Pro zdvih vně nedokrytí, tedy pro  $x_s > x_0$  platí

$$Q_1 = a\sqrt{2} \cdot (x_0 + x_s) \cdot \sqrt{p_N - p} \quad (3.3.1-18)$$

$$Q_2 = a\sqrt{2} \cdot (x_0 + x_s) \cdot \sqrt{p} \quad (3.3.1-19)$$

z čehož průtok  $Q$  pak vychází

$$Q = a \cdot (x_0 + x_s) \cdot \sqrt{p_N} \quad (3.3.1-20)$$

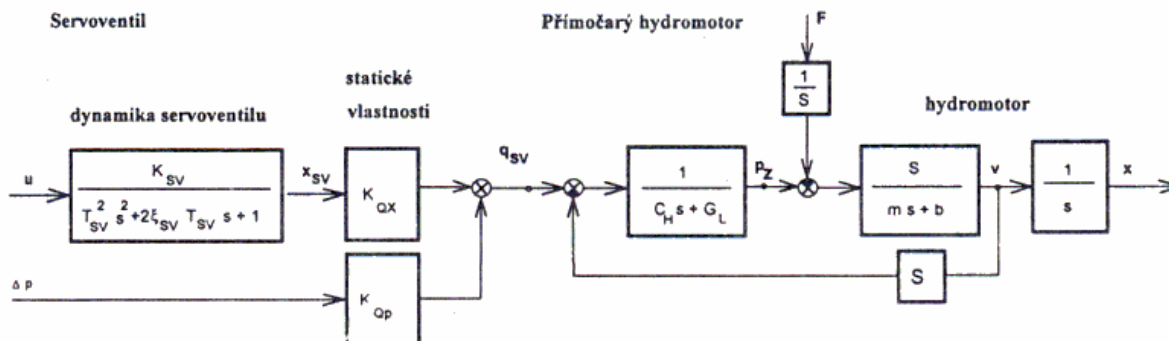
Jednoduchým porovnáním vztahu (3.3.1-17) pro průtok uvnitř a vztahu (3.3.1-20) pro průtok vně nedokrytí vyplývá změna průtokového zesílení (závislosti průtoku na poloze šoupátka) v oblasti uvnitř nedokrytí na dvojnásobek jmenovité hodnoty. U reálného zapojení navíc můžeme těžko předpokládat uvažovaná zjednodušení, takže výsledné chování bude ještě složitější.

V tomto místě stále ještě řešíme vztah průtoku servoventilem k poloze jeho šoupátka. U reálného servoventilu ale není řídicím signálem poloha šoupátka. Servoventil se řídí nejčastěji vstupním elektrickým proudem, který prochází cívkou a přestavuje šoupátko vzniklým magnetickým polem. Protože řídicí proud v tomto uspořádání by byl příliš velký, je převážná většina současných servoventilů ve dvoustupňovém provedení, čímž se velikost řídicího proudu řádově snižuje. K vlastnímu pohybu šoupátka servoventilu se používá tlaková kapalina a řízení polohy šoupátka realizuje na základě řídicího proudu vnitřní regulátor, nejčastěji jako převodník typu klapka-tryska s mechanickou zpětnou vazbou. Důkladný rozbor takového uspořádání je proveden například v literatuře [19]. Tento důsledný rozbor je však spíše vhodný pro samotné konstruktéry servoventilů. Běžný uživatel stejně nemá možnost do konstrukce servoventilu nijak zasáhnout a pokud by chtěl přesto pro modelování využít kompletní složitý model, nebude mít dostatek informací pro stanovení konstant modelu. Celé dynamické chování systému představující šoupátko lze zjednodušeně nahradit proporcionálním členem se setrvačností druhého řádu.

### 3.3.2. Problematika matematického modelování hydraulických obvodů

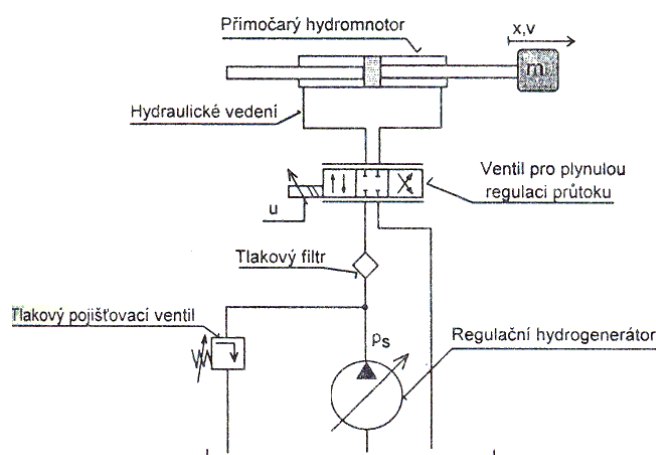
Jak už bylo konstatováno v předchozí kapitole, naráží modelování hydraulických prvků na řadu těžkostí. Pokud půjdeme co nejbližší realitě a použijeme složitý model, ve kterém budeme například u hydromotoru respektovat veškeré průsaky a tření v těsněních a u servoventilu namodelujeme celou jeho strukturu, dostaneme se nakonec do situace, kdy do dokončeného modelu budeme potřebovat dosadit konkrétní parametry. A zde narazíme na značný nedostatek informací. Příkladem mohou být právě hydromotory použité u plošiny. U jejich původního výrobce by se možná nějaké podrobné informace daly získat, ale motory byly dlouho v provozu a pak prošly repasí u úplně jiné firmy. Získat proto nějaké konkrétní údaje například o tření v těsněních, průsacích nebo svodové propustnosti je prakticky nemožné. Tyto údaje by však do podrobného modelu bylo potřeba dosadit. O mnoho lepší situace však není ani u úplně nových servoventilů. Výrobce v dokumentaci sice uvádí poměrně podrobné údaje, ale ty popisují chování ventilu jako celku. Vnitřní uspořádání je tam sice zobrazeno, ale žádné podrobnosti k němu nejsou publikovány. Z tohoto jednoduchého konstatování mi jasně vyplynulo, že nemá význam pouštět se do nějakého podrobného

modelu, když k třeba k servoventilu seženu jen tvary přenosové a frekvenční charakteristiky. I v literatuře zabývajícím se přímo modelováním [20] se nakonec dospěje ke značným zjednodušením a pracuje s linearizovaným modelem systému. Příklad takového modelu hydromotru se servoventilem je bez dalšího komentáře na obrázku 76.



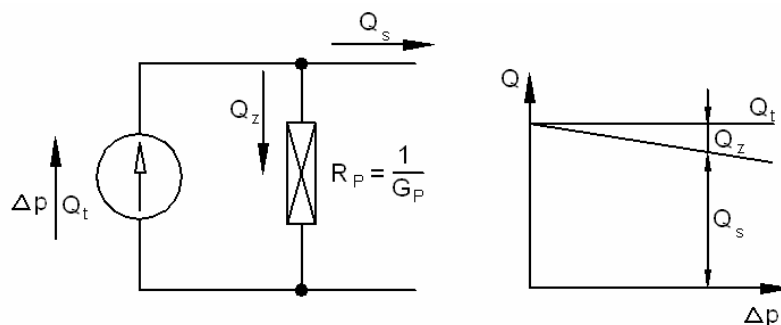
**Obr. 76 Příklad linearizovaného modelu servopohonu**

Tím však problematika modelování nekončí. Chování reálné soustavy je totiž ovlivněno mnoha dalšími faktory, zejména vlastnostmi hydrogenerátoru a celého přívodního potrubí. Celkový model tedy musí zahrnout i vlastnosti těchto prvků.



**Obr. 77 Celkové schéma hydraulického obvodu**

Hydrogenerátor představuje zdroj tlakové energie v obvodu. Ideálně je to zdroj konstantního průtoku a paralelně řazeného svodového odporu (převrácená hodnota svodové propustnosti).



Hydrogenerátor je charakterizován teoretickým objemem  $V_t$ , což je objem dodaný generátorem do obvodu za jednu otáčku. Pokud uvažujeme  $n$  otáček pak

$$Q_t = V_t \cdot n \quad (3.3.2-1)$$

Skutečný průtok je pak

$$Q_s = Q_t - Q_z = Q_t - G_p \cdot \Delta p \quad (3.3.2-2)$$

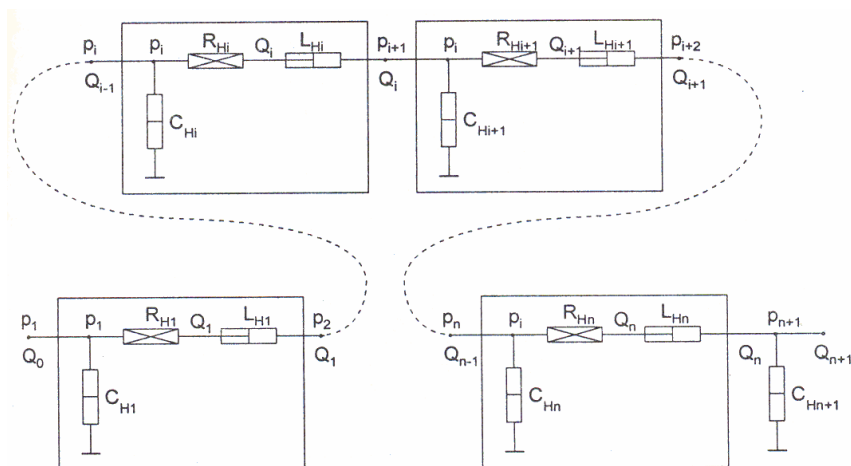
Pro dodržení konstantního průtoku musí být reálný hydrogenerátor vybaven regulačním mechanismem. Ten lze pro účely modelu opět nahradit proporčním členem se setrvačností druhého řádu.

Samostatnou kapitolu tvoří spojovací potrubí. Problematika jeho modelování je složitý problém. Potrubí totiž představuje systém s rozloženými parametry, jehož popis vede na parciální diferenciální rovnice. Z praktických důvodů se však nahrazuje navazující sestavou prvků se soustředěnými prvky. Celkové vedení se rozdělí na krátké úseky a každý úsek se popíše třemi prvky – hydraulickou kapacitou  $C_{Hi}$ , hydraulickou indukčností  $L_{Hi}$  a hydraulickým odporem  $R_{Hi}$ . Uspořádání těchto prvků v rámci jednoho úseku může být různé dle jeho charakteru (pevné potrubí, hadice,...). Počet úseků  $n$ , na který se vedení rozdělí, rozhoduje o přesnosti modelu. Doporučuje se, aby byla kratší než vlnová délka a delší než 0,1 vlnové délky vzniklých tlakových pulsací nejvyšší frekvence  $f$ , kterou uvažujeme při provozu. Mělo by tedy platit

$$\frac{l \cdot f}{c_0} < n < 10 \cdot \frac{l \cdot f}{c_0} \quad (3.3.2-3)$$

kde  $c_0$  = rychlost šíření zvuku v kapalině při daném tlaku.

Model hydraulického vedení by mohl tedy vypadat například takto:



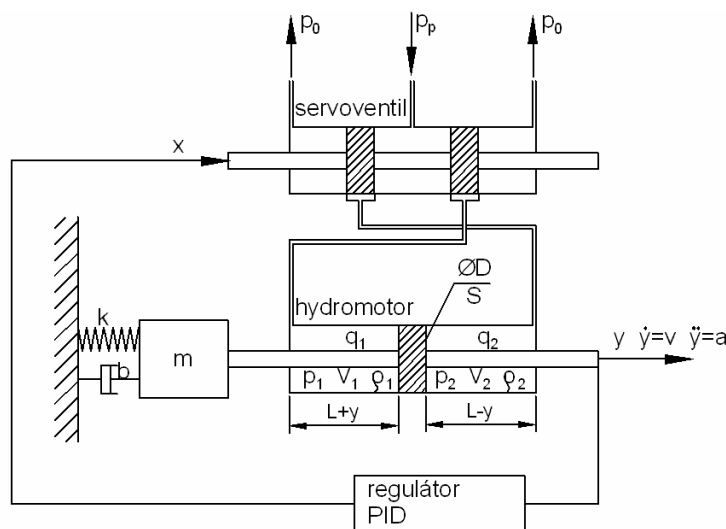
**Obr. 78 Příklad modelu hydraulického vedení se soustředěnými parametry**

### 3.3.3. Vytvořený model hydraulického servomechanismu

Hned úvodem této kapitoly chci konstatovat jeden fakt. Mým úkolem při konstrukci celé plošiny se šesti stupni volnosti nebylo vytvoření matematického modelu, jehož výstupem by byly krásně barevné grafy na monitoru počítače. Můj úkol byl mnohem náročnější. Já jsem musel v konkrétním časovém horizontu daným jednoznačným termínem dokončení vytvořit projekt celého ovládacího systému, ten vlastními silami sestavit a oživit, vybavit vlastní softwarovou real-timovou aplikací, uvést celé zařízení do provozu a ověřit v praxi jeho chování a vlastnosti, tak aby toto zařízení splnilo všechny požadavky normy ČSN EN ISO 13090-1. Vytvořený model je proto jen drobným kamínkem v celé mé práci. Byl vytvořen

proto, abych při ožívování regulace nemusel první hodnoty konstant P, I, D „střelit“ od oka, ale mohl se alespoň o něco opřít.

Z tohoto důvodu jsem sestavil model co nejjednodušší, který, jak se nakonec ukázalo, daný účel beze zbytku splnil. Vzhledem k tomu, že v laboratoři je mezi hydrogenerátorem a vlastní plošinou asi 60 metrů potrubí, které je navíc nespočetněkrát zahnuto, sestává z trubek i hadic, jsou v něm filtry, mechanické ventily, elektromagnetické ventily v napájecích a navíc ještě několik různých akumulátorů tlaku, rozhodl jsem se vzhledem k problematice popsané v předešlé kapitole celkový model hydraulického obvodu opustit. Proto jsem do modelu zahrnul jen vlastní hydromotor a servoventil, na jehož vstupu jsem předpokládal ideálně konstantní zdroj tlaku. Schematický náčrtek modelu spolu s popisem významu jednotlivých veličin je na obrázku 79.



**Obr. 79 Vytvořený model hydraulického servomechanismu**

Obrázek slouží jednak pro popis principu modelu a zároveň je na něm ozřejměn význam jednotlivých symbolů použitých v následujících rovnicích.

Základem modelu je popis mechanicko – hydraulické části.

Hydromotor:

Pohybová rovnice hmoty m je

$$m \cdot \ddot{y} + b \cdot \dot{y} + k \cdot y = S \cdot (p_1 - p_2), \text{ kde } b = \xi \cdot 2 \cdot \sqrt{k \cdot m} \quad (3.3.3-1)$$

dále určíme, že hmota kapaliny v levé komoře (označené indexy 1) je

$$m_1 = \rho_1 \cdot V_1 \quad (3.3.3-2)$$

a průtok do komory 1 tedy činí

$$q_1 = \dot{m}_1 = \dot{\rho}_1 \cdot V_1 + \rho_1 \cdot \dot{V}_1 \quad (3.3.3-3)$$

Předpokládáme-li, že  $p_p \gg p_0$ , pak

$$\dot{\rho}_1 = \frac{\rho_1}{k} \cdot \dot{p}_1 \quad \text{kde pro } \rho_1 \text{ platí } \rho_1 = \rho \cdot e^{\frac{1}{k}(p_1 - p_0)} \quad (3.3.3-4)$$

a dosadíme-li tento vztah do (3.3.3-3), dostaneme vztah pro průtok do komory 1 ve tvaru

$$q_1 = \frac{\dot{\rho}_1}{k} \cdot \dot{p}_1 \cdot S \cdot (L + y) + \rho_1 \cdot S \cdot \dot{y} \quad (3.3.3-5)$$

Dále můžeme tento průtok vyjádřit i z kontinuálního zákona jako

$$q_1 = c_0 \cdot s \cdot \sqrt{2\rho_1 \cdot (p_p - p_1)} \quad (3.3.3-6)$$



Vytkneme-li ze vztahu (3.3.3-6) konstantní členy a nahradíme je jedinou konstantou  $c$  ve tvaru

$$c = c_0 \cdot s \cdot \sqrt{2\rho_1} \quad (3.3.3-7)$$

pak lze tento vztah napsat ve zjednodušeném tvaru

$$q_1 = c \cdot x \cdot \sqrt{p_p - p_1} \quad (3.3.3-8)$$

Z obou vztahů pro  $q_1$ , tedy z (3.3.3-5) a (3.3.3-8) lze sestavit následující rovnici

$$c \cdot x \cdot \sqrt{p_p - p_1} = \frac{\dot{p}_1}{k} \cdot \dot{p}_1 \cdot S \cdot (L + y) + \rho_1 \cdot S \cdot \dot{y} \quad (3.3.3-9)$$

a z ní následně vyjádřit vztah

$$\dot{p}_1 = \frac{k}{\rho_1 \cdot S \cdot (L + y)} \cdot (c \cdot x \cdot \sqrt{p_p - p_1} - \rho_1 \cdot S \cdot \dot{y}) \quad (3.3.3-10)$$

Shodně můžeme postupovat i pro druhou komoru hydromotoru (označenou indexy 2), pouze musíme upravit znaménka a u posuvu počítat s  $L-y$ . Pro tuto stranu tedy platí

$$q_2 = \frac{\dot{p}_2}{k} \cdot \dot{p}_2 \cdot S \cdot (L - y) - \rho_2 \cdot S \cdot \dot{y} \quad (3.3.3-11)$$

z kontinuálního zákona pak

$$-c \cdot x \cdot \sqrt{p_2 - p_0} = \frac{\dot{p}_2}{k} \cdot \dot{p}_2 \cdot S \cdot (L - y) - \rho_2 \cdot S \cdot \dot{y} \quad (3.3.3-12)$$

takže analogicky k (3.3.3-10) pro levou komoru vyjde pro pravou komoru vztah

$$\dot{p}_2 = \frac{k}{\rho_2 \cdot S \cdot (L - y)} \cdot (-c \cdot x \cdot \sqrt{p_2 - p_0} + \rho_2 \cdot S \cdot \dot{y}) \quad (3.3.3-13)$$

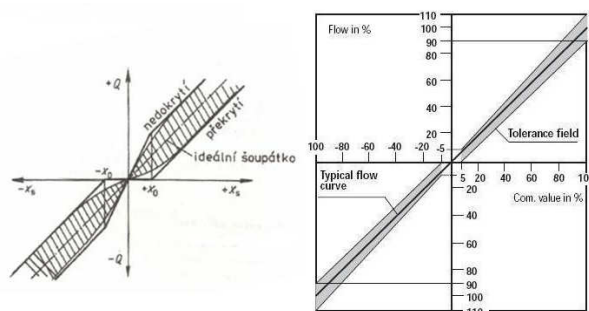
Výsledná soustava rovnic popisujících chování hydromotoru je tedy následující

$$\begin{aligned} \dot{y} &= v \\ \dot{v} &= \frac{1}{m} [S \cdot (p_1 - p_2) - b \cdot v - k \cdot y] \\ \dot{p}_1 &= \frac{k}{\rho_1 \cdot S \cdot (L + y)} \cdot (c \cdot x \cdot \sqrt{p_p - p_1} - \rho_1 \cdot S \cdot \dot{y}) \\ \dot{p}_2 &= \frac{k}{\rho_2 \cdot S \cdot (L - y)} \cdot (-c \cdot x \cdot \sqrt{p_2 - p_0} + \rho_2 \cdot S \cdot \dot{y}) \end{aligned} \quad (3.3.3-14)$$

**Servoventil:**

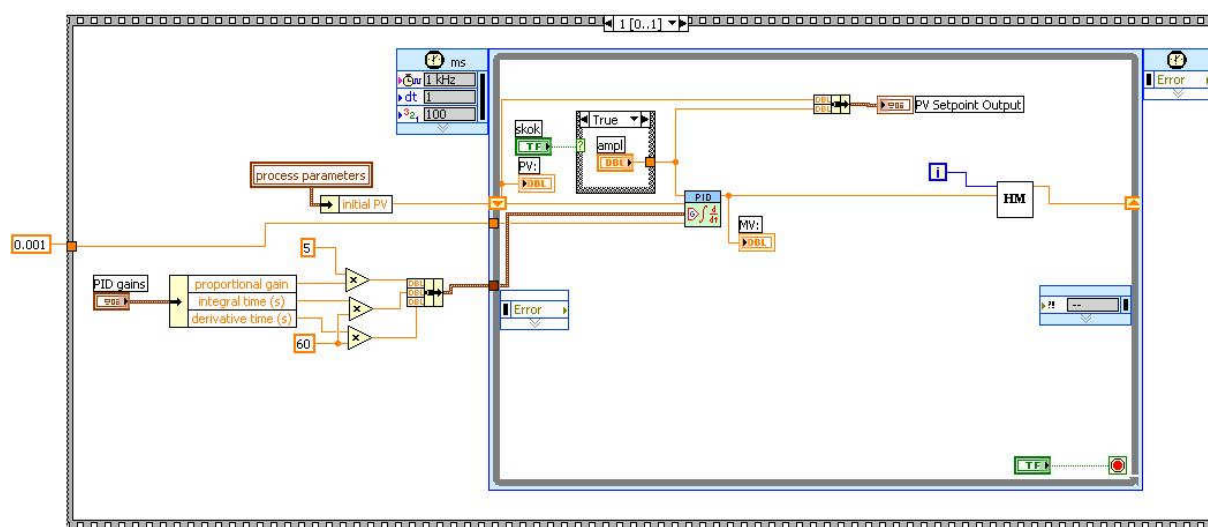
U modelu servoventilu jsem vycházel z vlastností servoventilů s nedokrytými hranami šoupátka. Ze vztahů (3.3.1-17) pro průtok uvnitř a vztahu (3.3.1-20) pro průtok vně nedokrytí vyplývá změna hodnoty průtokového zesílení uvnitř nedokrytí. Z tohoto důvodu jsem celkovou charakteristiku rozložil na čtyři úseky – pro každou polaritu výchylky část uvnitř a vně nedokrytí, aby tuto vlastnost šlo zachytit v modelu.

Odvození rovnic je podobné, jako u



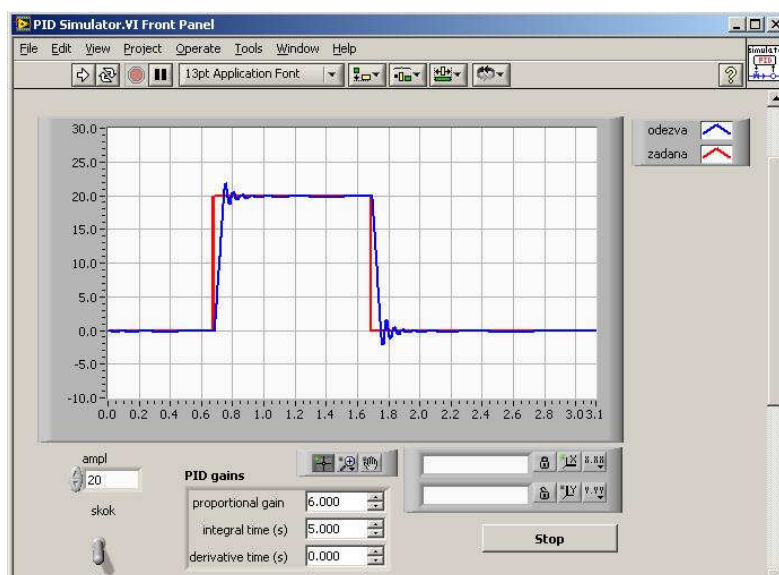
hydromotoru. Opět se vychází z pohybové rovnice hmoty – obdobně jako (3.3.3-1), tentokrát s parametry šoupátka servoventilu a dále se vyjádří průtoky v závislosti na poloze šoupátka obdobně s (3.3.3-8), podrobný postup zde již nebudu uvádět. Výsledkem je opět soustava nelineárních rovnic. V ní navíc model podle velikosti výchylky šoupátka přepíná konstantu průtokového zesílení.

Původní záměr byl namodelovat celé řešení v softwaru Mathcad 11.0. Při této realizaci by ale bylo nutné pochopitelně dosadit do modelu i vlastní PID regulátor. Aby se mi řešení zjednodušilo, rozhodl jsem se nakonec pro mé oblíbené Labview. Tím se navíc model dále přiblíží realitě, protože v modelu bude použit naprosto shodný regulátor PID, jako je v reálném systému. Labview obsahuje možnost vložit do něho matematickou soustavu rovnic – v Labview 8.2. navíc přibyl modul přímo pro zápis výpočtu ve formátu Mathcad.



Obr. 80 Model servomechanismu v prostředí Labview

Regulační smyčka simuluje regulační periodou 1ms, stejně jako v reálu. Ve smyčce je standardní PID regulátor a „krabička“ HM je podprogram, který simuluje chování sestavy hydromotor se servoventilem. Uvnitř obsahuje právě výše odvozené soustavy rovnic. Pro ladění regulátoru se mi osobně nejvíce líbí zobrazovat přechodovou charakteristiku – tedy odezvu na Heavisideův skok. Ten je sice v praxi nerealizovatelný, ale vstupní signál, který má v čase  $t$  hodnotu 0 a v čase  $t+1$  již hodnotu plné výchylky se softwarově realizuje velice snadno a ideálnímu skoku se hodně přibližuje. Tak byla sestavena i tato aplikace.



Obr. 81 Čelní panel aplikace PID simulator

V okně lze nastavit hodnotu skoku a „ručním“ přepnutím přepínače se skokem změni žádaná hodnota jdoucí do regulátoru. Odezva systému je vidět v grafu. Hodnoty PID pro regulátor jde měnit opět přímo na panelu, konstanty soustavy hydromotoru byly nastaveny „natvrdo“ přímo v modulu rovnic.

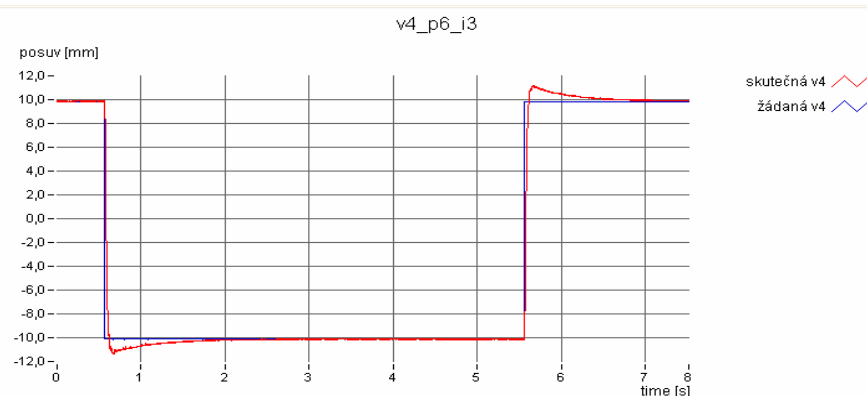
Poznámka: průběh zobrazený na čelním panelu na obr. 81 neodpovídá skutečným hodnotám. Snímek panelu byl jen jako ilustrační pořízen v počáteční době sestavování modelu, kdy ještě nebyly všechny konstanty v soustavě rovnic nastaveny dle parametrů reálných dílů.

Pro nalezení optimální odezvy jsem již nepoužíval žádnou analytickou metodu. Po desetileté zkušenosti v hydrodynamické laboratoři se mi jeví metoda „nastavit PID, vygenerovat skok a posoudit tvar přechodové charakteristiky“ nejrychlejší. Zvláště, když při tom nejde nic reálného zničit, což byl právě tento případ. Po několika „cvičných“ průchodech jsem dospěl k hodnotě  $P=6$  a  $I=3$ . Derivační konstantu jsem nechal pro jistotu nulovou.

### 3.3.4. Optimalizace reálných parametrů PID regulace

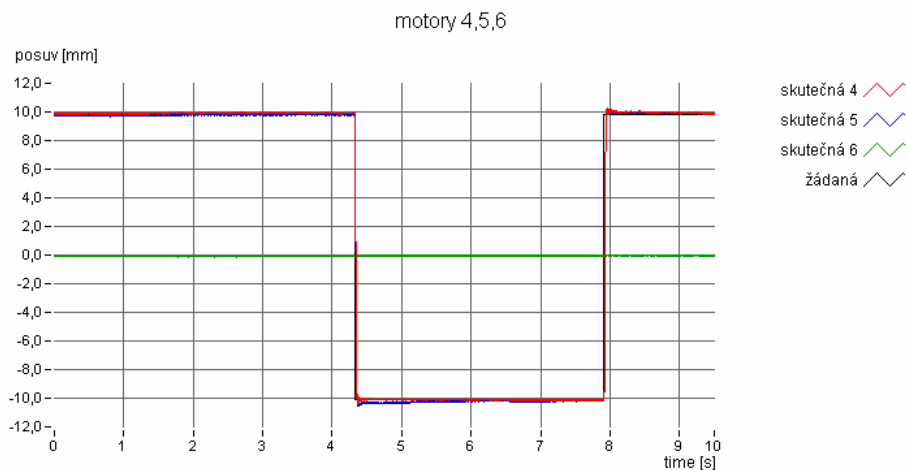
Po zjištění hodnot konstant  $P$  a  $I$  na modelu, jsem přistoupil k ladění reálného systému. Metoda ladění byla shodná jako u modelu, tedy měření přechodové charakteristiky. Bylo mi jasné, že reálný výsledek nebude plně odpovídat chování modelu vzhledem ke všem zjednodušením, které v modelu byly. Ladění jsem začal na motoru číslo 4, což je jeden z vodorovných motorů. Tam realita více odpovídá modelu, protože na svislém motoru visí hmota plošiny, což v modelu nebylo zohledněno. Pro toto ladění jsem upravil aplikaci *pl\_reg* (viz. 3.2.5). Na čelním panelu přibyl přepínač pro skokovou změnu žádané hodnoty. V této variantě tedy byla porušena zásada negenerovat nic v reálném čase. Žádaná hodnota byla generována přímo aplikací *pl\_reg* dle jednoduchého pravidla: přepínač dolu = žádaná hodnota rovna nule, přepínač nahoru = žádaná hodnota rovna nastavené konstantě.

Měření přechodové charakteristiky bylo opět provedeno nezávislým systémem odbočením signálu polohy z vany zesilovačů. Aby bylo možno porovnat tento záznam s průběhem žádané hodnoty, musel jsem v aplikaci *pl\_reg* vyrobit ještě jednu úpravu. Žádaná hodnota totiž nikam reálně ve formě signálu nevede. Je to jen číslo uvnitř aplikace *pl\_reg*, které se ihned uvnitř této aplikace použije jako vstup do regulátoru a reálně vede ven až vypočtená akční veličina pro servoventil. Naštěstí má použitá výstupní karta PXI 6713 osm analogových výstupů a dva jsou tedy volné. Bylo tedy velmi snadné založit do definovaných úloh na jeden z volných kanálů další analogový výstup a na něj v aplikaci *pl\_reg* posílat žádanou hodnotu. Takto upravená aplikace se používá jen pro ladění, běžný uživatel se k ní nedostane. Po všech těchto úpravách jsem tedy přikročil k vlastnímu ladění. Nastavil jsem zjištěné hodnoty  $P$  a  $I$  ( $D$  zůstalo 0) a s rukou na tlačítku TOTAL STOP jsem kliknul na přepínač. Výsledek předčil všechna očekávání, žádná destrukce se nekonala. Přechodová charakteristika navíc byla docela slušná.



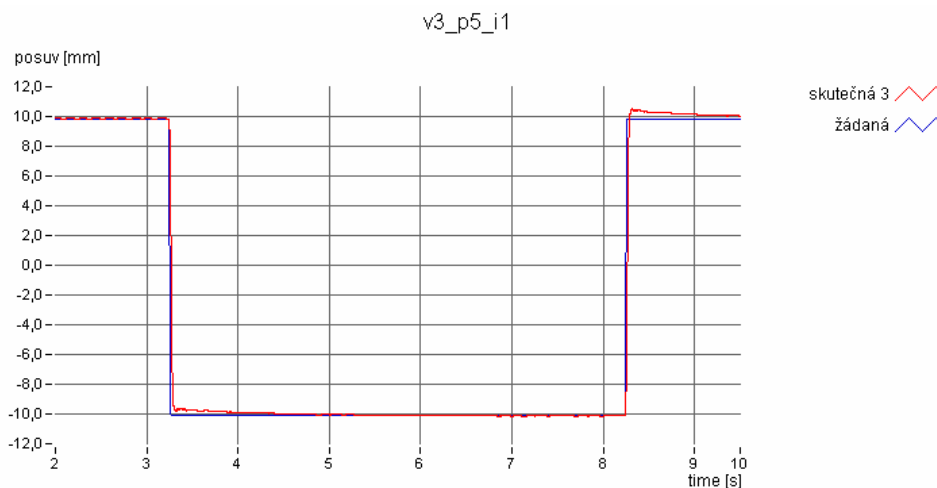
Obr. 82 Odezva motoru 4 na skok s parametry  $P$  a  $I$  dle modelu

Nyní následovalo ladění podobné při práci na modelu, ze tvaru přechodové charakteristiky vyplývalo snížení  $P$  a zkrácení doby integrace. Po několika průchodech jsem dospěl k finálnímu nastavení ( $P=4.5$  a  $I=1$ ) a to pak aplikoval na všechny tři vodorovné motory. Výsledek je na dalším obrázku.



**Obr. 83 Konečné naladění regulace pro vodorovné motory**

Odezva všech motorů je prakticky shodná a já jsem byl s tímto průběhem přechodové charakteristiky spokojen. U svislých hydromotů jsem postupoval obdobně, i konstanty vyšly téměř shodně ( $P=5$  a  $I=1$ ). Ukázalo se však, že hmota visící na pístnicích ovlivňuje tvar přechodové charakteristiky různě při skoku vzhůru a dolů (což je mimochodem celkem logické a vlastně očekávané). Příklad je na dalším obrázku pro přehlednost jen pro jeden svislý motor (u všech je to ale obdobné).

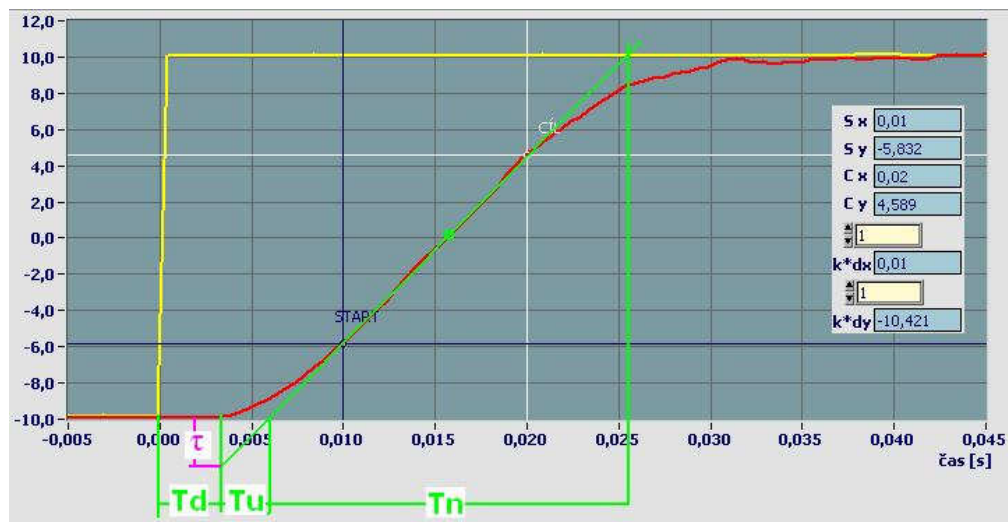


**Obr. 84 Přechodová charakteristika motoru 3**

Z přechodové charakteristiky je vidět nesouměrnost při obou polaritách skoku. Kladný směr posuvu je vysouvání pístnice, tedy směr dolů, takže vlivem gravitace dochází v tomto směru k překmitu. U jiných řídicích systémů v laboratoři (kde je chování pochopitelně stejné) se to řeší různou sadou konstant PID pro kladné a záporné výchylky. To ale bohužel neumí modul regulátoru PID z rozšíření Labview, který je pro regulaci plošiny použit. Toto je tedy v současné době u plošiny nevyřešený problém. Jedinou možnost vidím v úpravě modulu nebo ve vytvoření vlastního kódu pro PID regulátor. Kterou variantu v budoucnosti zvolím bude záležet na struktuře kódu použitého regulátoru, tj. zda je uživatelsky modifikovatelný. Některé moduly dodávané v Labview jsou totiž vytvořeny v C++ a běžný uživatel nemá možnost je nijak modifikovat.



Poslední informací, která z tohoto měření vyplynula, je maximální rychlost, kterou se motory mohou pohybovat. Tu jsem jednoduše odečetl opět z přechodové charakteristiky (kontrolním zobrazením akční veličiny pro servo jsem ověřil plné otevření servoventilu po skoku).



**Obr. 85 Detail přechodové charakteristiky pro zjištění maximální rychlosti**

Na obrázku 85 je přechodová charakteristika motoru č.4 při uzavřené regulační smyčce, je to jen v časové ose zvětšený průběh jednoho z motorů z obrázku 83. Z polohy kurzorů lze odečíst  $dx=0,01s$  a  $dy=10,421mm$ , tedy přibližně 10mm posuvu za 10ms, což odpovídá předpokládané maximální rychlosti motorů 1m/s.

Zároveň tento detailní obrázek umožňuje charakterizovat chování celého systému. Charakteristika je aperiodická, z tvaru lze usoudit na soustavu minimálně druhého řádu s dopravním zpožděním. Z grafu lze stanovit:

dopravní zpoždění  $T_d = 3.5ms$

doba průtahu  $T_u = 2.5 ms$

doba náběhu  $T_n = 20 ms$ .

Z podobnosti trojúhelníků lze dále stanovit hodnotu  $\tau$

$$\tau = \frac{T_u}{T_n} \quad (3.3.4-1)$$

Takže vychází  $\tau = 0,125$ .

V literatuře [21] je uvedeno, že pro systémy s hodnotou  $\tau > 0,1$  lze systém aproximovat proporcionální soustavou n-tého řádu se stejnými časovými konstantami, tedy přenosem

$$G(s) = \frac{K}{(T \cdot s + 1)^n} \cdot e^{-T_d s} \quad (3.3.4-2)$$

Zesílení  $K$  lze stanovit jako poměr ustálených hodnot výstupního a vstupního signálu (v případě plošiny je  $K=1$ ) a řád soustavy lze určit z následující tabulky (opět převzaté z literatury [21]).

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\tau$	0,104	0,218	0,319	0,41	0,493	0,57	0,642	0,709	0,773
$y_i$	0,264	0,327	0,359	0,371	0,384	0,394	0,401	0,407	0,413

Z hodnoty  $\tau = 0,125$  vychází  $n = 2$ , takže regulační systém motoru lze aproximovat soustavou druhého řádu. Z tabulky lze rovněž zpřesnit hodnotu inflexního bodu  $y_i$  a z naměřené přechodové charakteristiky odečíst časovou hodnotu tohoto bodu  $T_i = 13ms$ .

Hodnota časové konstanty se spočte

$$T = \frac{T_i - T_d}{n - 1} \quad (3.3.4-2)$$

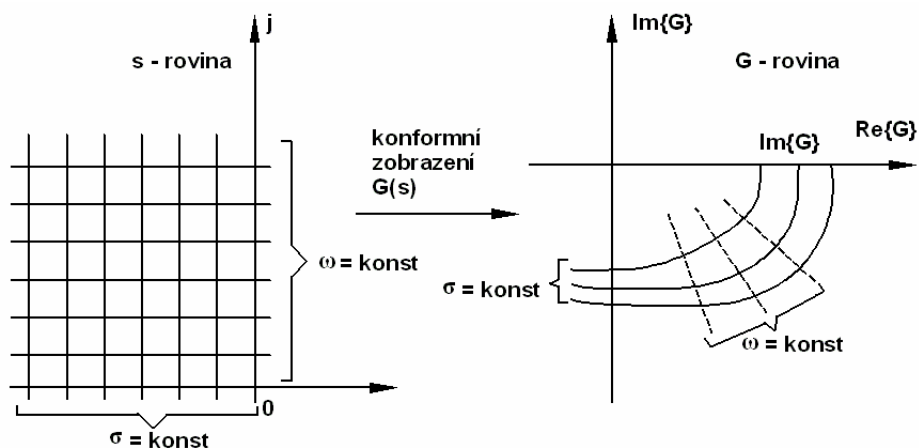
Dosazením konkrétních hodnot vychází

$$T = \frac{0,013 - 0,0035}{2 - 1} = 0,0095, \text{ tedy časová konstanta přibližně } 10\text{ms.}$$

Tolik k jednoduché identifikaci chování regulačního systému plošiny.

### 3.3.5. Měření frekvenčních charakteristik plošiny

Přenos systému  $G(s)$  vyjádřený pomocí komplexní funkce komplexní proměnné  $s$ , popisuje konformní zobrazení komplexní roviny  $s$  do komplexní roviny  $G$ . Zobrazení je ortogonální, zůstává zachována kolmost rovnoběžek v  $s$ -rovině pro  $\sigma = \text{konst}$ ,  $\omega = \text{konst}$  a kolmost křivek v  $G$ -rovině, které zobrazují jednotlivé rovnoběžky.



Přenos systému  $G(s)$  je definován pomocí Laplaceovy transformace jako Laplaceův obraz váhové funkce  $g(t)$

$$G(s) = L\{g(t)\} = \int_0^{\infty} g(t) \cdot e^{-st} dt \quad (3.3.5-1)$$

Podobně platí pro Fourierovu transformaci

$$G(j\omega) = F\{g(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3.3.5-2)$$

Fourierova transformace ale existuje pouze platí-li

$$\int_{-\infty}^{\infty} |g(t)| dt < \infty \quad (3.3.5-3)$$

Jelikož váhová funkce  $g(t)$  je definována pro  $t \geq 0$ , je zřejmé, že pro interval od  $-\infty$  do 0 platit

$$\int_{-\infty}^0 |g(t)| dt = 0 \quad (3.3.5-4)$$

Ize upravit Fourierův obraz váhové funkce 3.3.5-2 na tvar

$$G(j\omega) = \int_0^{\infty} g(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3.3.5-5)$$

Porovnáním 3.3.5-1 a 3.3.5-5 můžeme konstatovat, že frekvenční přenos lze získat formální záměnou komplexní proměnné  $s$  za  $j\omega$ , tedy substitucí  $s = j\omega$ .

Pro praktické měření frekvenčních charakteristik je třeba přivést na vstup systému vhodný signál a měřit odezvu na výstupu. Jednou z možností je použít jako budící signál bílý šum. To je signál, kde jsou následující hodnoty signálu statisticky nezávislé. Jako v čase spojitý proces představuje bílý šum signál s nekonečně velkými amplitudami, který nemá žádné vnitřní souvislosti. Autokorelační funkce je rovna Diracovu impulsu

$$R_{xx}(\tau) = S_0 \cdot \delta(t) \quad (3.3.5-6)$$

Spektrální výkonová hustota bílého šumu je

$$S_{xx} = \int_{-\infty}^{\infty} S_0 \delta(t) \cdot e^{-j\omega t} dt = S_0 \quad (3.3.5-7)$$

Je tedy konstantní pro všechny úhlové frekvence. Z toho plyne, že pokud na vstup systému přivedeme tento šum, tak provedením FFT analýzy výstupního signálu dostaneme přímo průběh frekvenční charakteristiky. Zde je ovšem třeba konstatovat, že bílý šum je fyzikálně nerealizovatelný. Pro praktické aplikace ho můžeme nahradit signálem, který má vlastnosti bílého šumu v rozsahu frekvencí reálně používaných v měřeném systému. Pro změření vlastností plošiny jsem použil jinou metodu, protože pustit na vstup bílý šum mi přišlo riskantní. Tato metoda je založena na buzení systému harmonickým signálem, na vstup tedy přivedeme

$$u(t) = A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3.3.5-8)$$

Na výstupu pak obdržíme

$$y(t) = A_2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (3.3.5-8)$$

V ustáleném stavu pak můžeme odečíst velikost amplitudy  $A_2$  a z poměru amplitud získat hodnotu zesílení

$$A(\omega) = |G(j\omega)| = \frac{A_2}{A_1} \quad (3.3.5-9)$$

Z časového posunutí vstupního a výstupního signálu  $\Delta t$  lze vyhodnotit fázový posuv

$$\varphi(\omega) = \omega \cdot \Delta t \quad (3.3.5-10)$$

Frekvenční přenos je tedy

$$G(j\omega) = A(\omega) \cdot e^{-j\varphi(\omega)} \quad (3.3.5-11)$$

Z něho lze vyjádřit reálnou a imaginární složku

$$U(\omega_i) = A(\omega_i) \cdot \cos \varphi(\omega_i) \quad V(\omega_i) = A(\omega_i) \cdot \sin \varphi(\omega_i) \quad (3.3.5-12)$$

a tyto hodnoty lze již přímo použít pro vynesení bodu do komplexní roviny. Pro  $i = 0..N$ , tedy pro sadu různých frekvencí budícího signálu, dostaneme  $N$  bodů a jejich propojením křivku frekvenční charakteristiky v komplexní rovině.

Druhým častým vyjádřením frekvenční charakteristiky je vynesení dvou grafů – amplitudové a fázové charakteristiky, tedy závislosti zesílení  $A(\omega)$  na fázového posuvu  $\varphi(\omega)$  na hodnotě  $\omega$ . Tato závislost se často vyjadřuje v logaritmických souřadnicích a zesílení se může ještě vyjádřit v decibelech, tedy

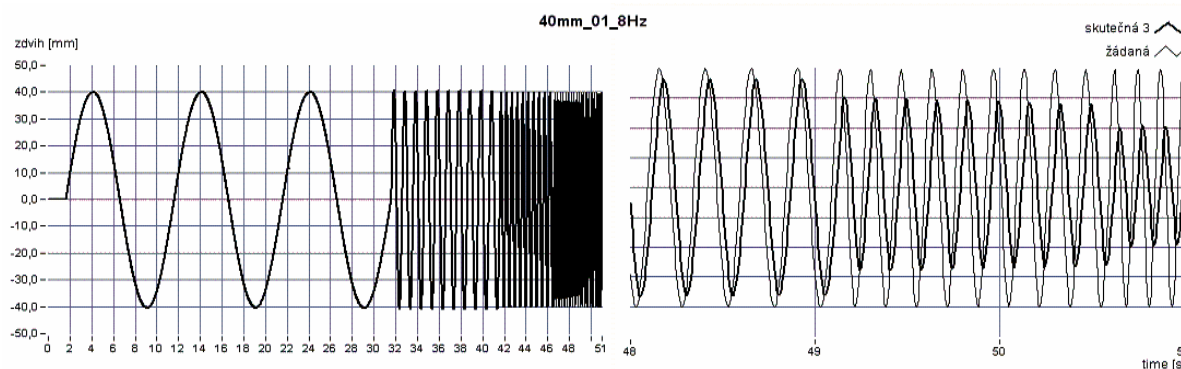
$$L(\omega) = 20 \cdot \log A(\omega) \quad (3.3.5-13)$$

Pro praktickou realizaci je tedy potřeba budit vstup harmonickým signálem o různých frekvencích. Pro každou frekvenci je třeba nechat systém ustálit a odečíst amplitudu výstupního signálu a časový posuv oproti vstupnímu signálu. Aby se měření zrychlilo, budil jsem vstup sekvencí harmonických signálů o konstantní amplitudě a postupně se zvyšující frekvencí. Na každé frekvenci trvalo buzení několik sekund, aby se systém stihl ustálit. Tato měření jsem opakoval i s různou amplitudou budícího signálu. Před generací signálů jsem si stanovil pro každou z amplitud maximální hodnoty frekvencí, do kterých má smysl měření provádět. Limitním faktorem bylo překročení maximální rychlosti 1m/s, kterou je motor schopen realizovat. Při vyšších požadovaných rychlostech již stejně harmonický signál není reprodukován, na výstupu je jakýsi zaoblený trojúhelník a zařízení je jen zbytečně mechanicky namáháno v oblastech, kde stejně nikdy nebude pracovat. Cílem měření bylo stanovit chování převážně v pracovní oblasti, proto testovací signál končil vždy těsně po překročení tohoto maxima. Skladba testovacích signálů je v následující tabulce.

		frekvence [Hz]										
		0	0,1	1	2	4	6	8	10	12	14	16
ampl	60 mm											
	40 mm											
	20 mm											
	10 mm											

Zeleně je vyznačena oblast, kde pro danou amplitudu nedojde k překročení maximální rychlosti, oranžově pak oblast, kam ještě pokračoval testovací signál.

Příklad budícího signálu a ukázka změřených signálů je na obrázku 86.



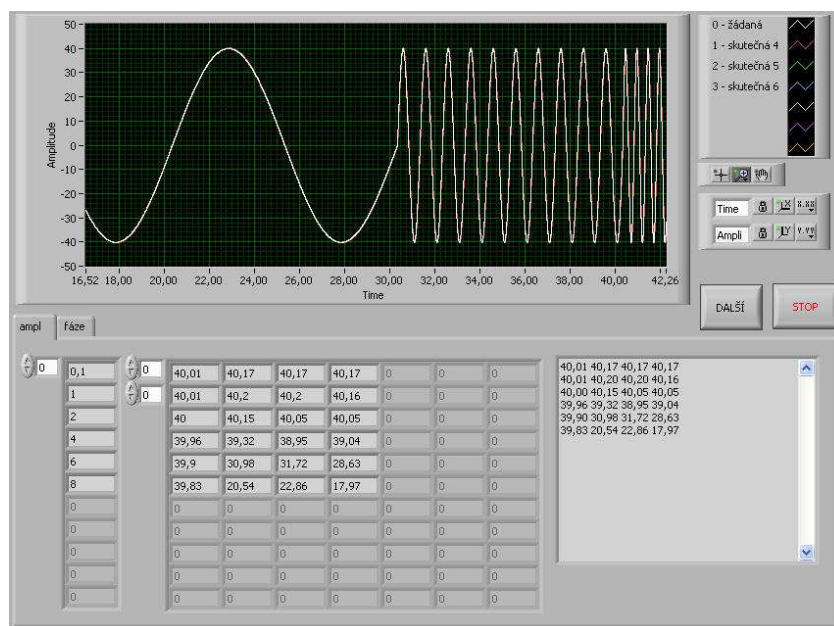
**Obr. 86 Ukázka budícího a měřeného signálu**

V pravé části obrázku je záměrně vybrán konec rozsahu, aby byl dobře patrný pokles amplitudy a fázový posuv vstupního a výstupního signálu.

Měření bylo uskutečněno stejně jako v případě přechodové charakteristiky, tedy upravená aplikace *pl\_reg* posílala na jeden z volných analogových výstupů žádanou hodnotu a nezávislým systémem DEWE 5000 byl měřen signál posuvu válců a žádaná hodnota. Signál byl generován již standardně ze souborů, testovací signály byly nagenеровány předem aplikací *pr\_generator* (viz.3.2.11). Po změření se ukázala zásadní nevýhoda této metody zjišťování frekvenčních charakteristik – obtížné vyhodnocení naměřených výsledků. Dat bylo velké množství – šest motorů, pro každý čtyři amplitudy a pro každou amplitudu sada čtyř až šestnácti frekvencí. Vyhodnocování poměrů amplitud a fázových posuvů ručním odečítáním hodnot z grafů by tedy předpokládalo trpělivou mravenčí a velmi dlouho trvající práci. Proto přišlo opět ke slovu moje oblíbené Labview a vznikla další utilitka, která celý proces plně zautomatizovala. Do aplikace se načetl soubor se změřenými daty, pak došlo k automatickému rozpoznání úseků jednotlivých frekvencí, v nich se změřila průměrná



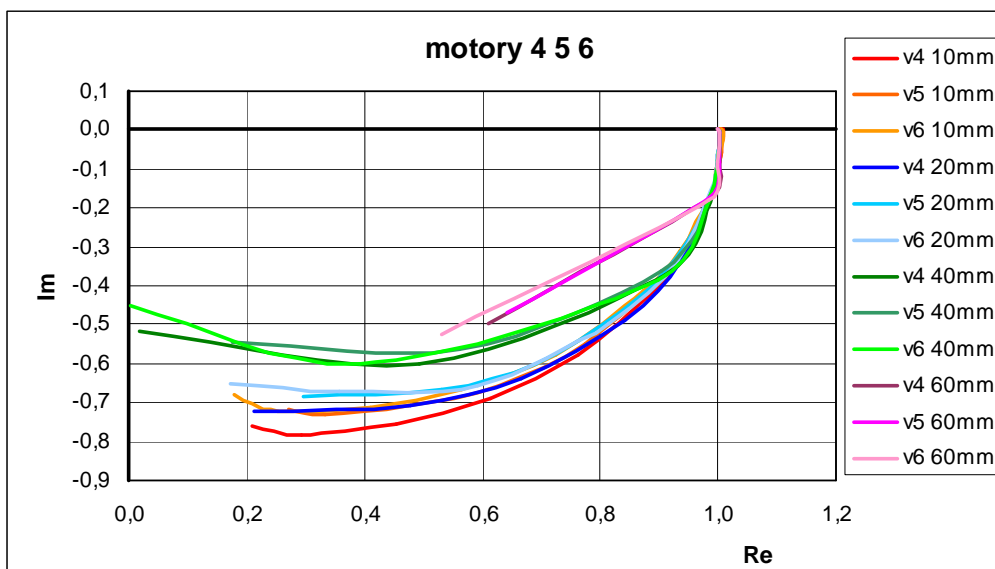
amplituda signálů a zároveň se spočítá i fázový posun. Výsledky, tedy hodnoty amplitud a fázový posuv, aplikace servírovala pěkně do tabulek. Čelní panel aplikace je na obrázku 87.



**Obr. 87 Aplikace pro vyhodnocení frekvenčních charakteristik**

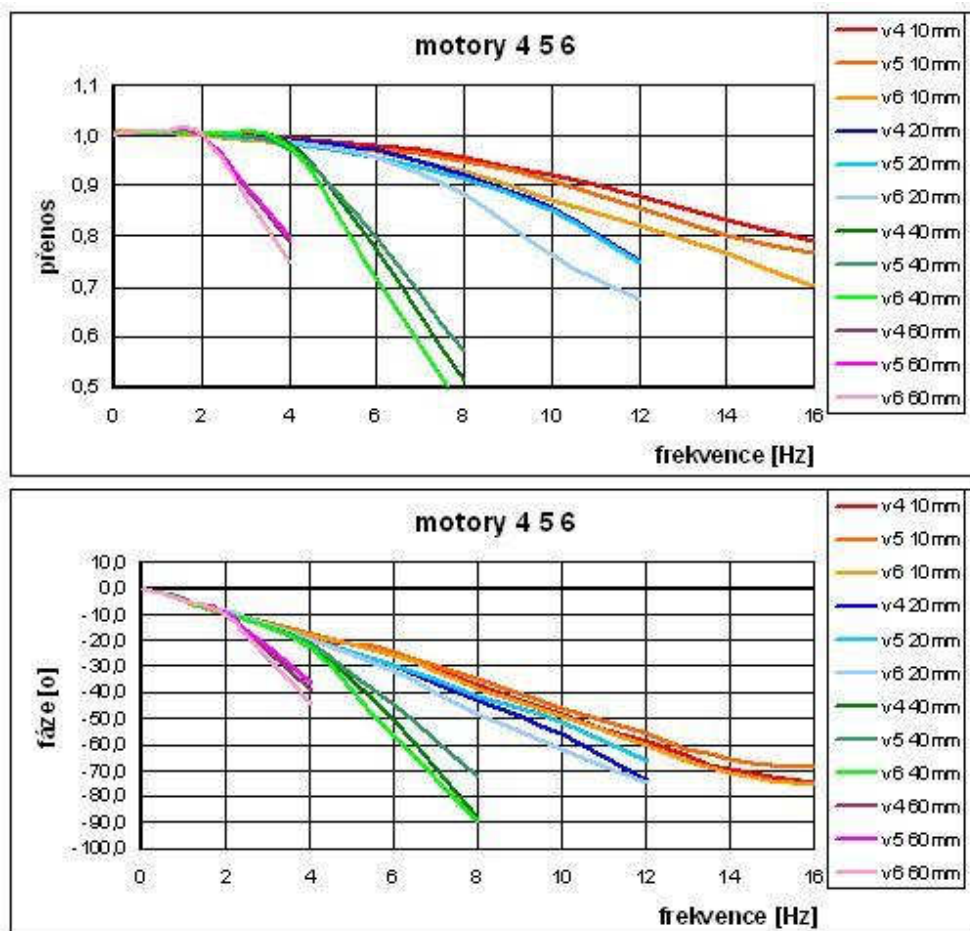
V grafu je pro kontrolu zobrazen načtený signál, dole vlevo je tabulka s detekovanými frekvencemi pro kontrolu správného rozdělení signálu na úseky a vpravo od ní tabulka s výsledky amplitud žádané a změřených hodnot, tabulka s fází je na další záložce (v tabulce jsou hodnoty jen pro tři motory, protože měření probíhalo pro každou trojici motorů zvlášť).

Vyhodnocení dat bylo s pomocí této aplikace již velmi jednoduché a výsledek je vidět na dalším obrázku.



**Obr. 88 Frekvenční charakteristika motorů 4,5 a 6 v komplexní rovině**

Jde o standardní zobrazení v komplexní rovině. Podobnou barvou je vždy vynesena průběh u tří motorů pro jednu hodnotu amplitudy. Měření bylo záměrně rozděleno do trojic, všech šest motorů v jednom grafu byla již velká změť čar. Frekvenční charakteristika se častěji vyjadřuje pomocí dvou grafů – amplitudové a fázové charakteristiky. Takovéto vyjádření téhož výsledku jako na předchozím obrázku je na dalším obrázku 89.



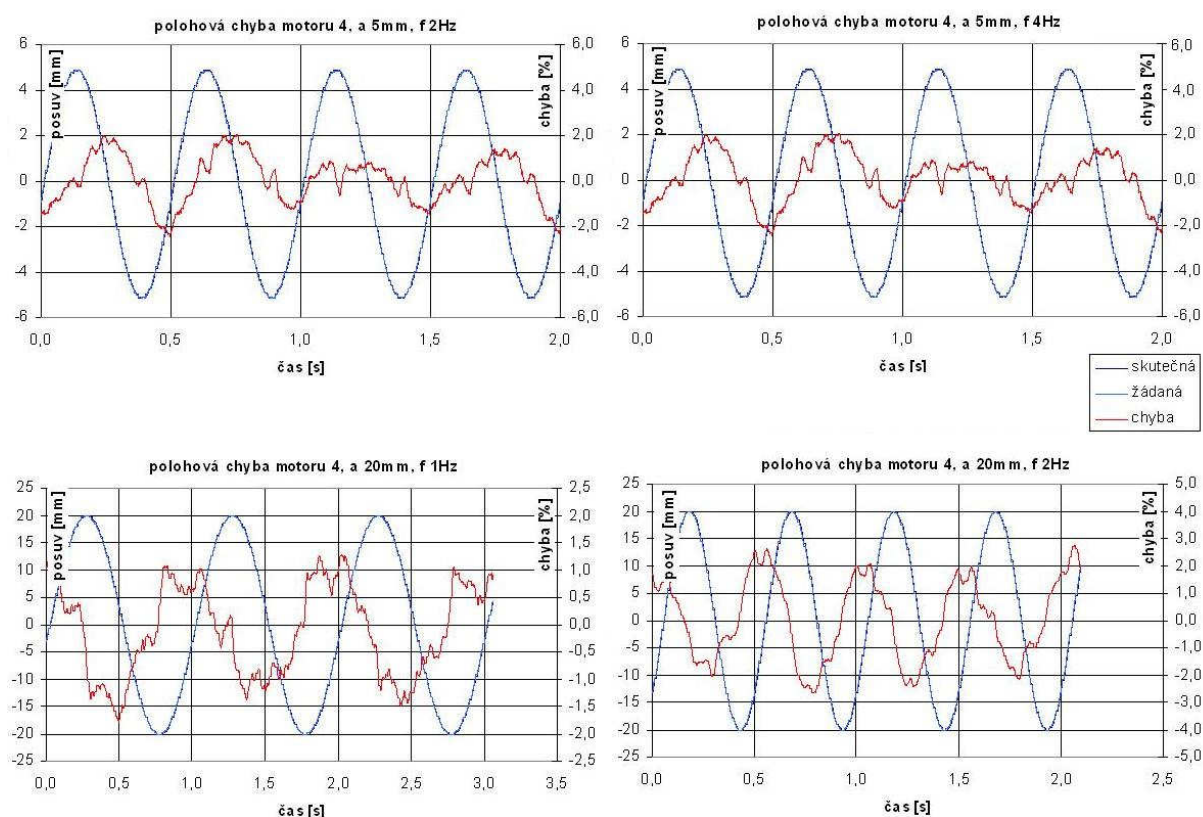
Obr. 89 Amplitudová a fázová charakteristika motorů 4,5 a 6

Výsledek odpovídá očekávání. Pro pomalejší rychlosti, tj. frekvence cca do pěti Hz je krásně vidět zlom při velkých amplitudách, kdy dojde k překročení maximální rychlosti motorů. Pro vyšší frekvence se již začne projevovat dynamika celého systému a přenos začne klesat dříve, než by odpovídalo této rychlosti. To je ovšem víceméně standardní chování hydraulicko-mechanické soustavy, projevující se i u jednoosých systémů. Potěšující však je, že motory jdou prakticky shodně, hlavně fázový posuv mezi nimi je minimální. To je podstatné pro kvalitní reprodukci signálů, výsledný posuv nebude zkreslen rozdílnou fází jednotlivých motorů. Shodný fázový posuv oproti žádané hodnotě prakticky nevadí a pokles amplitudy se dá ošetřit amplitudovou korekcí žádané hodnoty. To se běžně provádí i u jiných systémů používaných v laboratoři.

Poznámka na závěr: výsledky druhé trojice svislých motorů jsou prakticky shodné, proto jsem je zde již nepublikoval.

### 3.3.6. Stanovení polohové přesnosti hydraulického servomechanismu

Záznam měření frekvenčních charakteristik byl zároveň použit pro stanovení chyby, s jakou jednotlivé motory dosahují žádané polohy. Jako signál byl tedy použit harmonický budící signál a výsledná poloha byly porovnávány s požadovanou. Rozdíl signálů představuje chybu dodržování žádané hodnoty a tuto chybu jsem vyjádřil v procentech amplitudy žádané hodnoty signálu. Stanovení chyby jsem provedl pro několik různých amplitud a frekvencí. Zde budu opět publikovat jen vzorek výsledků, na následujícím obrázku je zobrazen průběh chyby pro motor 4.



Obr. 90 Grafické znázornění polohové chyby motoru 4

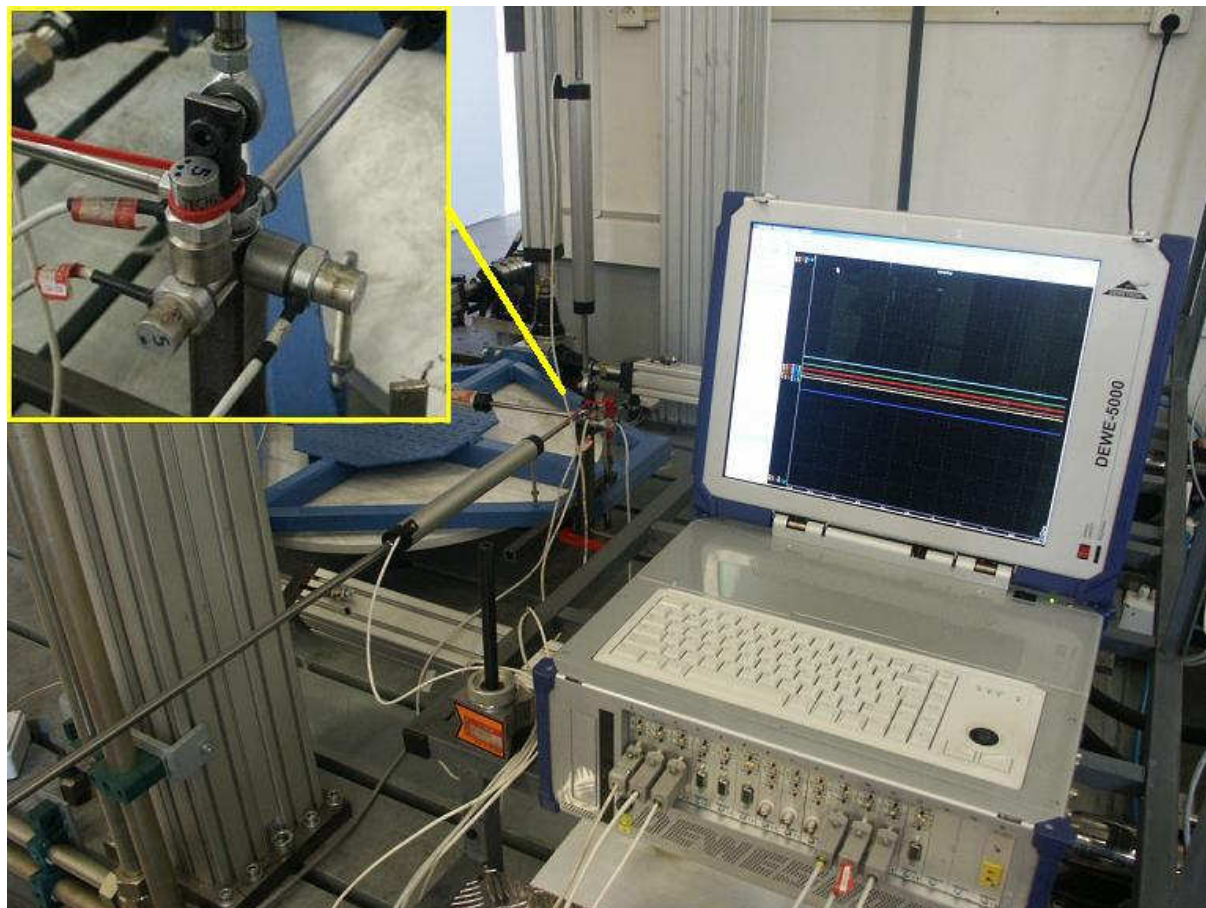
Vzhledem ke shodnosti motorů i výsledek zjištění chyby vychází obdobně i u dalších motorů použitých na plošině. Pro oblast frekvencí před zlomem amplitudové charakteristiky vychází okolo dvou procent amplitudy žádaného signálu.

### 3.3.7. Ověření funkčnosti zařízení při vykonávání reálné trajektorie

Pro zjištění komplexních vlastností plošiny bylo třeba kromě zjištění chování jednotlivých motorů, ověřit i celkovou funkčnost zařízení. Toto měření bylo založeno na následujícím principu. V prostoru plošiny byl náhodně zvolen kontrolní bod. Pro tento bod byla vygenerována prostorová trajektorie, která byla popsána časovým průběhem změn polohy v souřadnicích  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a zároveň zrychlením v těchto osách. Pohyb bodu byl pomocí kinematického modelu plošiny přepočten do posuvů jednotlivých motorů a tento signál byl použit pro buzení plošiny. Ve zvoleném kontrolním bodě byl zpětně odměřen posuv tohoto bodu a zrychlení ve třech osách a výsledek porovnán s původním zadáním. Tento postup odpovídá reálnému použití, kdy je právě většinou požadováno vykonání nějaké předepsané prostorové trajektorie. Kinematický model, který řeší přepočet trajektorie na posuvy jednotlivých motorů, není v této práci publikován. Nevytvářel jsem ho totiž já, ale jiný pracovník realizačního týmu. Pro mnou navržený řídicí systém je vstupní údaj právě až datový soubor s časovou závislostí posuvů jednotlivých motorů. Tento test tedy kromě řídicího systému ověřil i správnost přepočtu trajektorie na budící signály jednotlivých motorů. Kontrolní bod byl na plošině realizován připevněním kovového profilu. Na konec tohoto profilu byly ukotveny tři snímače posuvu a tři snímače zrychlení. Posuv byl snímán klasickými odporovými lineárními snímači upevněnými na kloubech. Prostorový pohyb totiž způsobuje naklápění snímačů mimo osu, kterou snímač měří. Aby se zmenšila chyba vznikající těmito odchylkami, byly snímače prodlouženy ocelovými tyčemi, takže jejich



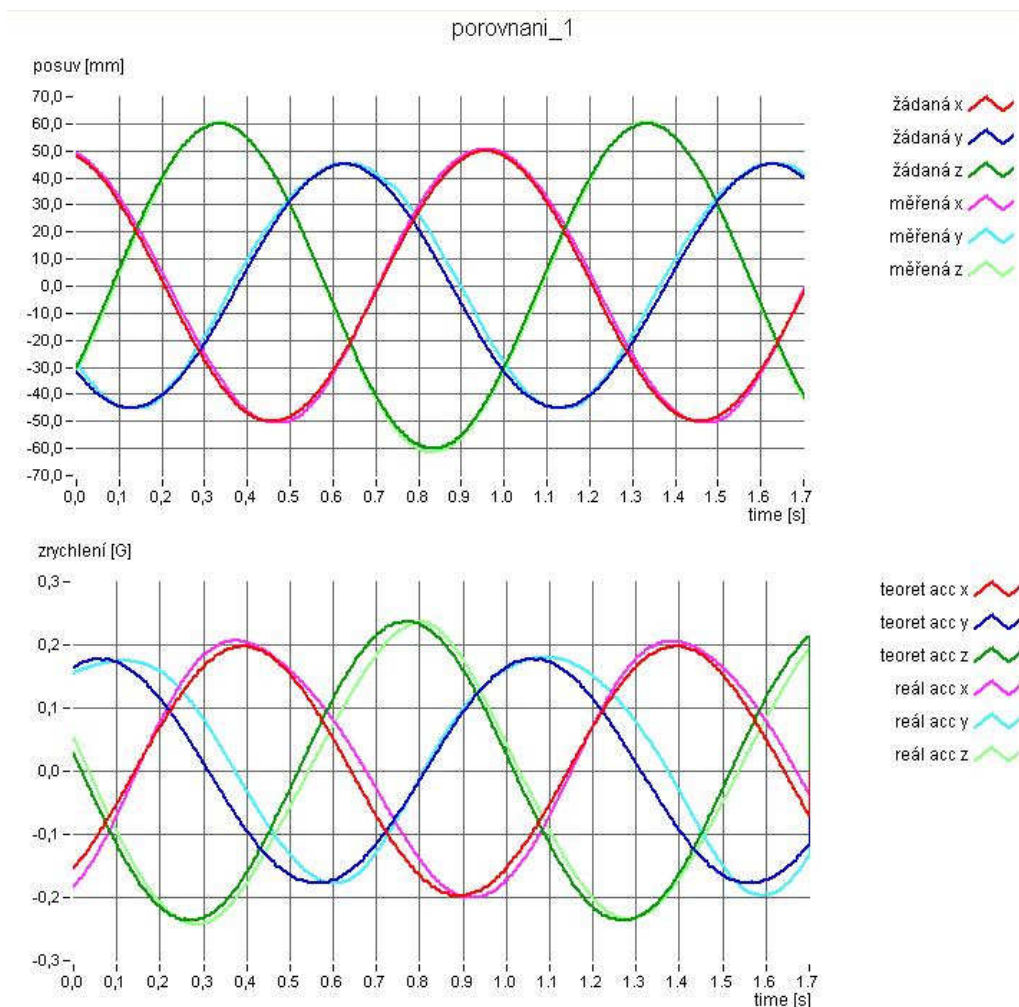
celková délka byla asi jeden metr. Trajektorie byla zvolena s menšími výchylkami, takže výsledný úhel odklápění snímačů od přesné osy nebyl velký a byl prostě zanedbán. Uspořádání experimentu s detailem kontrolního bodu je na dalším obrázku. Na detailu jsou vidět i tři snímače zrychlení upevněné v kontrolním bodě. I zde pochopitelně došlo k jisté chybě, protože naklápěcí kotevní oka tří snímačů posuvů a tři snímače zrychlení prostě do jednoho teoreticky určeného bodu umístit nelze.



Obr. 91 Experimentální ověření trajektorie kontrolního bodu

Změřené výsledky tedy byly zatíženy chybou ne zcela přesného ukotvení snímačů do zvoleného bodu a naklápěním snímačů od přesného směru osy. Na obrázku je konečně vidět i měřicí aparatura DEWE 5000, kterou jsem použil k realizaci všech měření publikovaných v této práci (pochopitelně mimo měření vlastností elektronických obvodů).

Ověrovacích měření pochopitelně proběhlo více, pro různé trajektorie bodu. Poloha kontrolního bodu zůstala vzhledem k poměrně složitému kotvení snímačů pro všechna měření shodná. Výsledky byly více než uspokojivé, odchylky výsledného pohybu od teoretického zadání nebyly nijak dramatické a dokonce i průběh zrychlení odpovídal zadání. Příklad výsledku jednoho kontrolního měření je na dalším obrázku.



Obr. 92 Porovnání teoretické a reálné trajektorie

### 3.4. ŘÍDÍCÍ SYSTÉM - SHRUTÍ

Řídicí systém, jehož návrh, realizaci, ladění i ověření jsem popsal v kapitole 3 splnil očekávání do něj vkládaná. Plošina se šesti stupni volnosti plní funkce, které se od tohoto zařízení požadují. Výsledné vlastnosti odpovídají očekávanému normálnímu chování hydrodynamických systémů. Chování systému je srovnatelné s ostatními řídicími systémy používanými v laboratoři. Dá se tedy konstatovat, že koncepce, kterou jsem zvolil, je správná a řídicí systém sestavený z výše popsaných komponent spolehlivě pracuje. Velkým přínosem je ale speciální softwarové vybavení, stvořené přímo pro tuto konkrétní aplikaci. Vytvořený software ošetřuje všechna specifika tohoto složitého zařízení a jeho koncepce minimalizuje možné chyby operátora při ovládání zařízení. Software navíc spolupracuje z bezpečnostním systémem, který bude popsán v následující kapitole a umožňuje tak používat zařízení pro testy s člověkem dle požadavků normy ČSN EN ISO 13090-1.



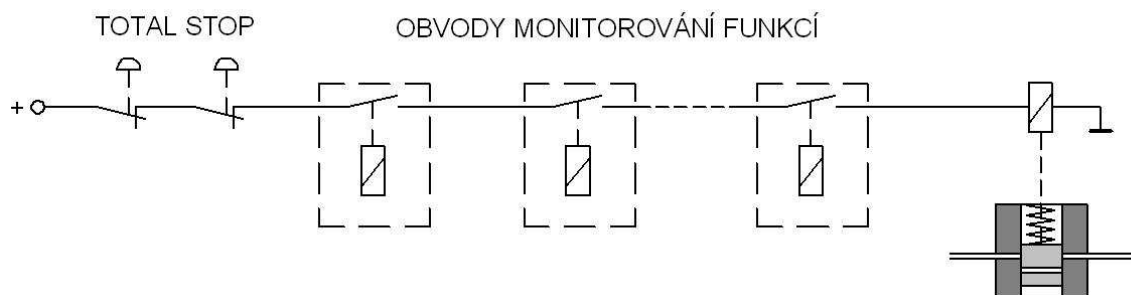
## 4. BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉM

### 4.1. STANOVENÍ KONCEPCE BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU

#### 4.1.1. Princip činnosti bezpečnostního systému

Z předchozího popisu použitých hydraulických servomechanismů vyplývá jeden podstatný fakt. Vzhledem k použití servoventilů s nedokrytými hranami lze při zapnutém hydraulickém napájení udržet motory v klidu jen činností zpětnovazební regulace. Kdyby tedy bezpečnostní systém v případě své aktivace měl plošinu dále polohově řídit, vedlo by to prakticky na zdvojení řídicího systému. Jednou z příčin poruchového stavu může být nejen výpadek jádra regulace (tedy systému PXI), ale i kterékoliv navazující části regulační smyčky včetně snímače polohy nebo servoventilu. Zdvojení by tedy muselo být stoprocentní. To se dá ještě akceptovat u snímačů polohy, kde by se mohly použít dva nezávislé snímače. Se servoventilem je situace složitější. Paralelní zapojení dvou servoventilů na jednom hydromotoru se sice také používá, ale servoventily jsou řízeny shodným signálem (např. k docílení větších průtoků a tím rychlosti pohybu). V případě poruchy by se však jeden servoventil musel vyřadit a do řízení zapojit záložní. Takovéto hydraulické zapojení servoventilů si však představit nedokážu. Proto jsem hned zpočátku od této varianty ustoupil. Bezpečnostní systém **nebude** plošinu dále řídit, jen ji v případě poruchy pokud možno definovaným způsobem zastaví. Takovýto princip navíc plně vyhovuje i normě (viz. kapitola 2.3.3). Celé řešení se tím podstatně zjednoduší, žádné zdvojování prvků nebude třeba. Jednoduchost bezpečnostního systému je totiž základem jeho bezchybné funkce. Bezpečnostní systém složitější než systém hlavní by totiž výslednou bezpečnost celého zařízení spíše ohrozil.

Další úvahy se tedy ubíraly směrem, jak plošinu v případě nějaké poruchy definovaně zastavit. Po mnoha konzultacích celého řešitelského týmu jsme nakonec zvolili řešení zastavení pohybu hydromotorů přerušením dodávky hydraulické energie. To se jeví jako velmi spolehlivé, nedodává-li se do systému hydraulický tlak, nemohou se pístnice motorů pohybovat ať už je stav všech ostatních obvodů jakýkoliv, tedy například i když je servoventil vlivem nějaké poruchy otevřen naplno. Do přívodu hydraulického oleje k motorům plošiny bude tedy zapojen nějaký odpojovač, který v případě poruchy zastaví přívod oleje k motorům. Aby tento prvek odpovídal normám pro bezpečnostní obvody, nesmí se uvádět do chodu vznikem poruchového signálu, ale naopak musí reagovat na výpadek „klidového“ signálu. To znamená, že například bez napájení elektrickou energií je ventil uzavřen, připojením napájení se otevře a umožní tak normální činnost zařízení. Bezpečnostní systém tedy za normálního provozu dodává ventilu energii, při vzniku poruchy se přívod energie přeruší a ventil se uzavře. Tímto jednoduchým principem se automaticky ošetří i všechny přetržené kabely, vypadnuté konektory, povolené svorkovnice, atd. Na tomto principu pak musí pracovat i všechny komponenty bezpečnostního systému. Jednotlivé obvody monitorování funkcí mají na svém výstupu spínací kontakt relé. Ten je sepnut v klidovém stavu, tedy pokud je sledovaná veličina v předepsaných mezích. Jakmile dojde k překročení, kontakt rozezne. Kontakt tak ale rozezne například i v případě přerušení napájení monitorovacího obvodu, nebo opět nějakého vypadnutí konektoru atd. Tím se opět zvyšuje odolnost proti poruchám uvnitř monitorovacích obvodů. Všechny kontakty monitorovacích obvodů včetně tlačítek Total stop jsou řazeny do serie a teprve správná činnost všech z nich dovede elektrickou energii k odpojovacímu ventilu, který sepne a umožní činnost zařízení. Tento princip odpovídá i všem požadavkům na zapojení tlačítek Total stop. Právě tato tlačítka nesmí být například vyhodnocována žádnou elektronikou, jejich stlačení musí přímo přerušit napájení nějakého odpojovače, který vyřadí zařízení z činnosti. Zvolený princip tomu plně odpovídá. Zapojení bezpečnostního systému, který odpovídá výše uvedeným zásadám je na obrázku 93.



**Obr. 93 Princip činnosti bezpečnostního obvodu**

Obrázek názorně popisuje princip skutečného zapojení bezpečnostního systému. Ten se sestává ze seriově zapojených tlačítek Total stop a několika monitorovacích obvodů, které napájejí elektromagneticky ovládaný hydraulický odpojovač. Ten je ve stavu bez napájení držen mechanicky (pružinou) ve vypnutém stavu. Teprve přivedení napájení na cívku elektromagnetu odpojovače dojde k jeho otevření.

O skladbě monitorovacích obvodů se opět v řešitelském týmu dlouze diskutovalo, protože odhalení poruchy a reakce systému musí být velmi rychlé. Uvážíme-li, že motory vyvinou při plném otevření serva rychlost okolo 1m/s a celkový zdvih je 200mm, dojde k přejezdu celého zdvihu za 200ms. V reálném provozu se pohybujeme vždy někde „uvnitř“ zdvihu, takže k některému z konců je to vždy blíže než těch 200mm a čas je proto ještě kratší. Na druhou stranu je nutné konstatovat, že k takové rychlosti musí být servoventil plně otevřen a rozjetí pístnice na tuto rychlost pochopitelně není také skokové, čímž trochu času opět získáváme. Takovéto skoky v rychlosti by však již mohly ohrozit testovanou osobu a proto by měl bezpečnostní systém reagovat pokud možno ještě dříve, než se servoventily vlivem poruchy stihnou otevřít a pístnice dosáhnou nebezpečných rychlostí. Nakonec jsme tedy navrhli následující skladbu monitorovacích obvodů. První monitorovací obvod bude hlídat pravidelnost běhu regulační smyčky a tím celého řídicího systému. K tomu se využijí čítače výstupní karty řídicího systému, které jsou nastaveny do funkce watchdog. Tato funkce byla již popsána v kapitolách 3.2.3. a 3.2.5. Druhý monitorovací obvod bude měřit zrychlení jednotlivých pístnic a hlídat překročení nastavených mezí (zrychlení jako jedno z hlídaných kritérií předepisuje i norma ČSN EN ISO 13090-1). Posledním obvodem bude spíše už taková pojistka v nouzi nejvyšší a to hlídání překročení vymezeného zdvihu pístnic. Jak už bylo uvedeno v kapitole 2.1. celkový zdvih pístnic motorů je  $\pm 100\text{mm}$ , ale při činnosti se využívá jen vnitřních  $\pm 70\text{mm}$ . Překročení této hranice bude monitorováno posledním obvodem. Tato hranice je již jen 30mm od konce zdvihu a bude-li překročena maximální rychlostí pohybu pístnice, zbývá již jen 30ms na nějakou akci. V tomto případě již k úplnému zabrzdění asi nedorazí, ale pořád je lepší alespoň nějaký pokus, než náraz pístnice na konec válce plnou rychlostí. K tomuto stavu by však prakticky nemělo dojít, rozjezd by měl již dříve zachytit monitor zrychlení.

Další monitorovací obvody již nesnímají přímo aktivity plošiny, ale spíše činnost ostatních obvodů – sem patří hlídání přítomnosti napájecího napětí a činnosti hydraulického agregátu. Patří sem i další tlačítka, o kterých byla již v předchozím text zmínka – tlačítko hardwarového potvrzení startu a tlačítko předčasného ukončení zkoušky. Na ně sice reaguje v první řadě software řídicího systému, ale bezpečnostní systém také. Poslední sadou obvodů jsou pomocné funkce, které hlídají bezpečnost vlastního zařízení. Zde se jedná o činnost motoru odsávání oleje, mazání a otevření mechanických ventilů na přívodním potrubí. Všechny funkce bezpečnostního obvodu shrnu do přehledu v následující kapitole.

Nyní ještě uvedu poznámku k hydraulickému odpojovači. Na něj je totiž také kladen požadavek rychlosti jeho akce. I když tedy volba vhodného odpojovače nebyla přímo mojí prací, ale spadala do kompetence „hydraulikáře“ ve vývojovém týmu, podílel jsem se na

mnoha měření, která jeho volbu přímo ovlivňovala. Proto se jeho volbou budu zabývat i ve své práci.

#### **4.1.2. Shrnutí požadovaných funkcí bezpečnostního systému**

Bezpečnostní systém bude monitorovat následující funkce, které se navíc dají rozdělit do několika skupin, podle typu reakce bezpečnostního systému:

Skupina 1: podmínka spuštění zařízení

- Nestlačená tlačítka Total stop
- Přítomnost elektrického napájení
- Otevřené mechanické ventily na potrubí
- Hydraulický agregát v chodu
- Stlačení tlačítka hardwarového potvrzení startu

Skupina 2: okamžité zastavení chodu

- Stlačení tlačítek Total stop
- Monitor watchdog, kontrola běhu řídicího systému
- Monitor zrychlení, kontrola zrychlení pístnic jednotlivých motorů
- Monitor polohy, kontrola překročení vymezeného zdvihu

Skupina 3: odložené zastavení pohybu

- Stlačení tlačítek předčasného ukončení zkoušky
- Výpadek napájení (činnost zařízení je jištěna UPS)
- Výpadek odsávání průsaků

Poznámka ke skupině 3

Aktivity zařazené do třetí skupiny neohrožují přímo ani testovanou osobu ani zařízení. Jsou proto bezpečnostním systémem ošetřeny s pevně nastavenou časovou prodlevou. Tím je dána možnost zpracovat tento stav nejprve řídicím systémem, tj. zastavit normálním způsobem činnost zařízení. Teprve kdyby řídicí systém nereagoval, dojde k zastavení stejným principem jako u skupiny 2.

#### **4.1.3. Princip měření při ověřování funkcí bezpečnostního systému**

Během vývoje a ověřování funkčnosti jednotlivých dílů bezpečnostního systému jsem prováděl celou řadu měření výsledného chování celého systému. Všechna měření probíhala obdobně jako při ladění dynamických vlastností řídicího systému a proto zde jejich princip uvedu již jen ve zkratce. K záznamu byla opět použita ústředna DEWE 5000 a průběh poloh pístnic vybraných motorů se opět snímal odbočením signálů za vstupními zesilovači pomocí BNC konektorů na zadní straně vany zesilovačů. Další signály byly již snímány nezávislými snímači, které byly vždy podle potřeby umístěny na zařízení.

V případě testů bezpečnostního systému se vždy jednalo o změření odezvy na nějakou poruchu. Poruchy byly většinou simulovány softwarově, pro tento účel jsem upravil aplikace *pl\_user* a *pl\_reg*. Úprava umožňovala „generovat“ vznik poruchy i v závislosti na právě probíhající reálném pohybu a tím simulovat vznik poruchy v nejneprůzračnějším stavu (například výpadek řídicího systému při velké rychlosti pohybu těsně před koncem vymezeného prostoru  $\pm 70\text{mm}$ ). Informace o vzniku poruchy byla opět snímána měřicí

ústřednou DEWE 5000. Reálný signál o vzniku poruchy byl získáván přímým připojením vstupu měřicího kanálu do vybraného místa silového rozvaděče. Vždy se jednalo o měření bezpečného napětí 24V z ovládacích obvodů rozvaděče.

Tolik o obecném zapojení měřicích obvodů. Detailní údaje o zapojení a systému generování poruchy budou uvedeny vždy u konkrétního měření.

## 4.2. HYDRAULICKÝ ODPOJOVAČ

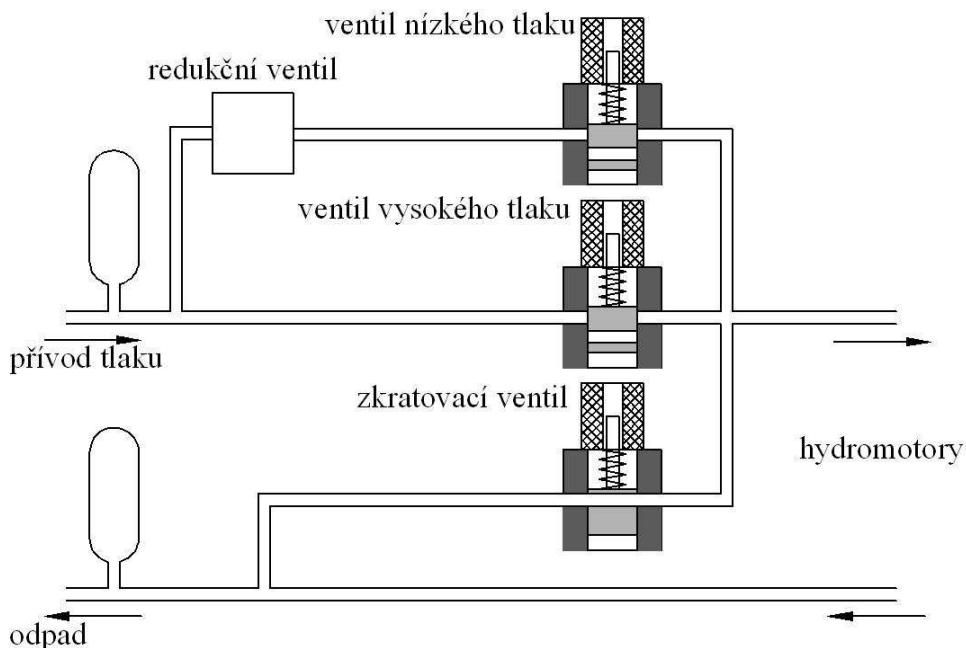
### 4.2.1. Úvodní úvahy

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, realizační tým rozhodl, že nouzové zastavení pohybu plošiny bude probíhat odpojením přívodu hydraulické energie do motorů. Toto odpojení přitom musí být dostatečně rychlé, aby byl pohyb zastaven včas, ale zase nesmí být skokové, aby jeho aktivací nedošlo ke skokovým změnám rychlosti nebezpečným pro testovanou osobu.

Podíváme-li se znovu na hydraulické schéma plošiny v kapitole 2.2.5, je z něj patrné, že zařízení, která dokáží odpojit přívod hydraulické energie k motorům na základě elektrického signálu již plošina obsahuje. Prvním z nich je hydraulický napaječ (na plošině jsou použity dva, vždy pro trojici motorů jeden), který připojuje hydraulické obvody plošiny k rozvodům laboratoře. Druhým prvkem je samotný servoventil na každém z motorů. První úvahy se tedy ubíraly směrem použít pro havarijní zastavení některý z těchto prvků.

### 4.2.2. Napaječ jako bezpečnostní odpojovač

Zapojení použitých napaječů je věnována kapitola 2.2.3. Na dalším obrázku proto uvedu trochu jiné principiální schéma, které ozřejmí funkci napaječe z hlediska použití v bezpečnostních obvodech.



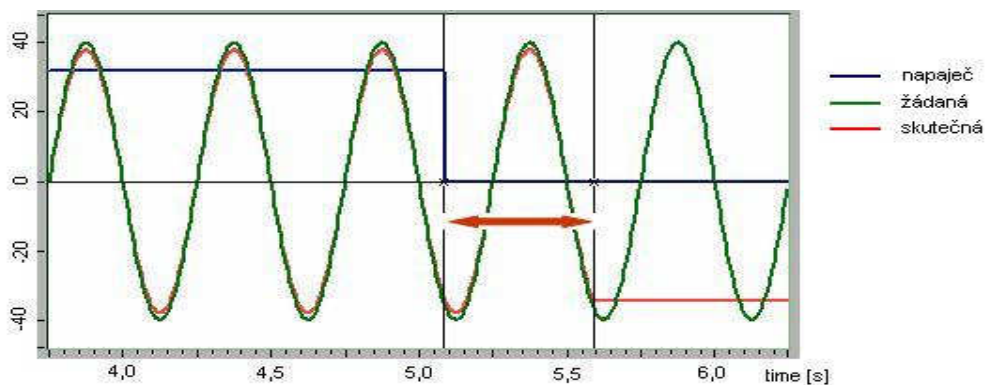
**Obr. 94 Principiální schéma napaječe**

Z obrázku je patrné, že napaječ svou konstrukcí plně odpovídá požadavkům na použití v bezpečnostních systémech. Dva ventily pro nízký a plný tlak, které pouští hydraulickou



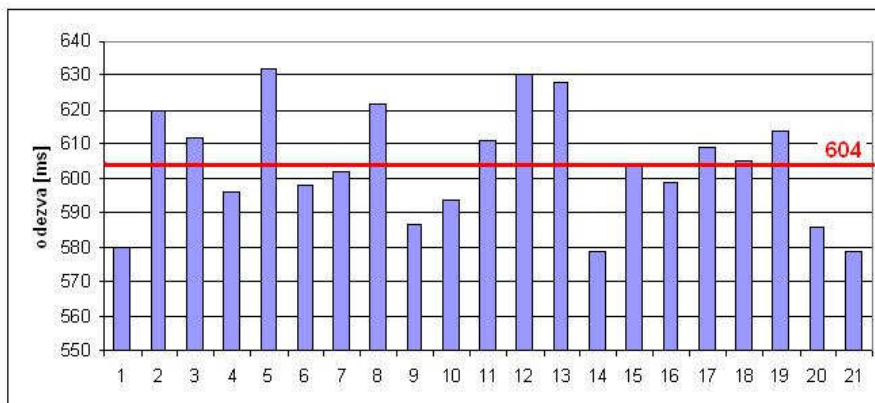
kapalinu k následujícím motorům, mají správnou logiku spínání, tedy „bez napájení zavřeno“. Napaječ dokonce obsahuje i třetí ventil, který má vyloženě bezpečnostní funkci. Je to zkratovací ventil, který propojuje tlakovou větev do odpadu. Ten má obrácenou funkci, tedy „bez napájení otevřeno“. V okamžiku odpojení elektrického napájení se tedy nejen uzavřou přívodní ventily, ale ještě se otevře ventil zkratovací, který umožní rychlý pokles tlaku v následném systému. Tam totiž může být v akumulátorech zásoba další hydraulické energie. Otevřením zkratovacího ventilu se akumulátory vyprázdní do odpadní větve.

Vzhledem k výše uvedeným vlastnostem se tedy v první fázi zdál být problém hydraulického odpojovače vyřešen, protože napaječ plní jeho funkci stoprocentně. Zbývalo tedy ověřit jeho činnost v praxi. Pro měření jsem zvolil následující postup. Hydraulické motory byly buzeny harmonickým signálem, plošina tedy byla normálně v pohybu. Příímým zásahem operátora bylo v náhodném čase odpojeno elektrické napájení ventilů napaječe. Měřicí ústředna DEWE 5000 zaznamenávala pohyb pístnic motorů paralelním odměřováním polohy a zároveň bylo na další vstup vyvedeno napájecí napětí ventilů napaječe. Smyslem měření bylo pochopitelně určit reakční dobu napaječe, tedy dobu, která uplyne od povelu pro odpojení napájení ventilů napaječe do skutečného zastavení pohybu pístnic. Podotýkám, že řídí systém o odpojení napaječů „nevěděl“, po celou dobu měření tedy dál normálně probíhala generace signálu. Měření jsem provedl pro více různých kombinací signálů, aby byla zohledněna různá „spotřeba“ motorů – tedy různě velký průtok kapaliny napaječi. Příklad výsledků experimentu je na obrázku 95.



Obr. 95 Příklad měření odezvy napaječe

Na záznamu je vidět stav elektrického napájení ventilů napaječe, generovanou žádanou hodnotu a skutečný pohyb pístnice jednoho z motorů. Červenou šipkou je zdůrazněna prodleva mezi signálem pro odpojení a skutečným zastavením pohybu. Tato doba byla odečítána jako rozdíl polohy kurzorů vždy pro motor, který se zastavil jako poslední. Výsledné hodnoty pro celou řadu různých amplitud, frekvencí a kombinací pohybu motorů jsou v následujícím grafu.



Obr. 96 Záznam dob odezvy napaječe

Hodnoty byly nakonec zprůměrnovány do jediného čísla a výsledek byl 604ms. Vzhledem k maximální dosahované rychlosti pístnic 1m/s a zdvihu 200mm by motor během reakční doby napáječe ujel celý zdvih ještě přibližně třikrát. Toto velmi závažné zjištění vlastně ukázalo, že napáječ je vzhledem k době odezvy jako hydraulický odpojovač v krizovém stavu nepoužitelný. Dlouhá reakční doba se tak trochu dala čekat, způsobuje ji vlastní provedení ventilů napáječe. Vzhledem k velkému průtoku kapaliny jsou ventily dvoustupňové, hlavní ventil je ovládán hydraulicky pomocí dalšího elektromagnetického ventilu (opět odkazují na schéma napáječe v kapitole 2.2.3).

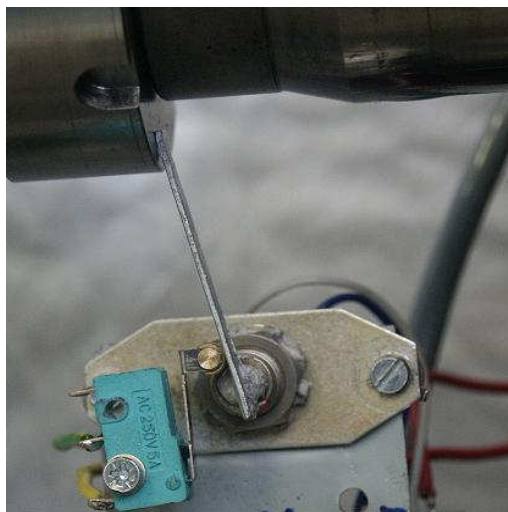
Závěrem tohoto měření je tedy konstatování, že napáječ nesplňuje podmínky pro nouzové zastavení pohybu plošiny vzhledem k dlouhé reakční době. Přesto bude do bezpečnostního obvodu zapojen, protože jeho vypnutím dojde k úplnému odtlakování celého systému rozvodů kapaliny na plošině. To je důležité v případě havárie typu „prasklá hadice“. Pro včasné zastavení pohybu však bude potřeba doplnit hydraulické obvody nějakým dalším zařízením.

Na úplný závěr této kapitoly ještě malá poznámka ke grafu na obrázku 94. Práce na plošině neprobíhaly přesně ve sledu popsaném v této práci. Měření reakční doby se uskutečnila na úplném počátku oživování zařízení ještě před kalibrací snímačů polohy a naladěním regulace (v provozu byl jen regulátor P) a proto je v záznamu patrná velká odchylka mezi žádanou a skutečnou hodnotou. To však na výsledky těchto měření nemělo žádný vliv.

#### 4.2.3. Servoventil jako hydraulický odpojovač

Po zjištění potřeby ubrzdít v havarijní situaci pohyb pístnic rychleji, než odpojením napáječe se pozornost obrátila na další prvek, který již hydraulický obvod obsahuje – vlastní servoventil. Úvaha byla taková, že bezpečnostní systém by prostě současně s vypnutím napáječe přerušil i elektrické napájení servoventilů. Tím by se servoventily uzavřely, pohyb zastavil a dlouhá reakční doba napáječe by tak nevadila. Proti mluvila jedna z vlastností použitých servoventilů – šoupátko s nedokrytými hranami. Přerušením elektrického napájení cívky ventilu se sice šoupátko vrací do střední polohy, ale k úplnému uzavření průtoku nikdy nedojde. Důsledkem toho je náhodný pohyb pístnice k jedné z krajních poloh. Princip funkce servoventilu byl již opět v této práci popsán a to v kapitole 2.2.2.

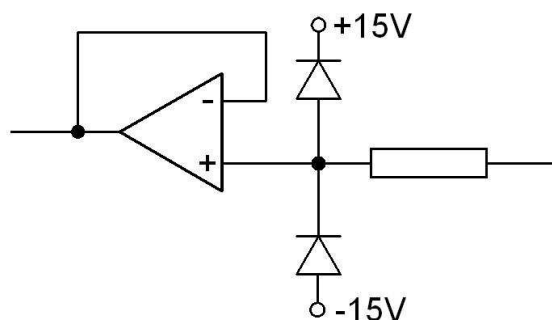
Z výše uvedeného důvodu jsem se rozhodl provést další sadu měření chování systému při vypnutí napájení servoventilů. Zároveň s tímto měřením byla ověřována i možnost detekování překročení vymezeného zdvihu pístnice  $\pm 70\text{mm}$ . V první fázi se jednalo o mechanický kontakt. Pro měření byl vyroben reálný přípravek s mikrospínačem, který přerušil proud do servoventilu při najetí pístnice do kritické polohy. Uspořádání je na obrázku 97.



**Obr. 97 Mikrospínač překročení kritické polohy**

Zapojení měřicího řetězce bylo stejné jako v minulém případě. Buzení pohybu tentokrát nebylo harmonickým signálem, ale pístnice různou rychlostí „najížděla“ lineárně na rozpínací kontakt mikropsínače.

Hned první pokus měl destruktivní následky. Servoventil je indukční prvek a přerušení proudu pochopitelně vyvolá vznik indukovaných napětíových špiček v obvodu. Ty nevydržel vstup zpětnovazebního zesilovače v obvodu napětově – proudového převodníku (ve schématu převodníku na obrázku 24 v kapitole 3.1.3. označen číslem 3). Vzhledem k použití čtveřice OZ v jednom pouzdru to znamenalo vyměnit celý tento obvod. Pro účely tohoto experimentu byl vstup operačního zesilovače následně ochráněn pomocí rychlých diod dle následujícího schématu. Pak již měření probíhalo bez katastrofálních následků pro elektronické obvody.



Obr. 98 Ochrana vstupu zpětnovazebního operačního zesilovače

Měření bylo prováděno jen na jednom válci a během testů bylo sledováno jen chování samotného servoventilu, mikropsínač tedy přerušil proud do servoventilu, ale neodpojoval současně napaječ, jak by tomu bylo při reálném použití. Příklad chování je pro dvě různé najížděcí rychlosti na grafech na obrázku 99.



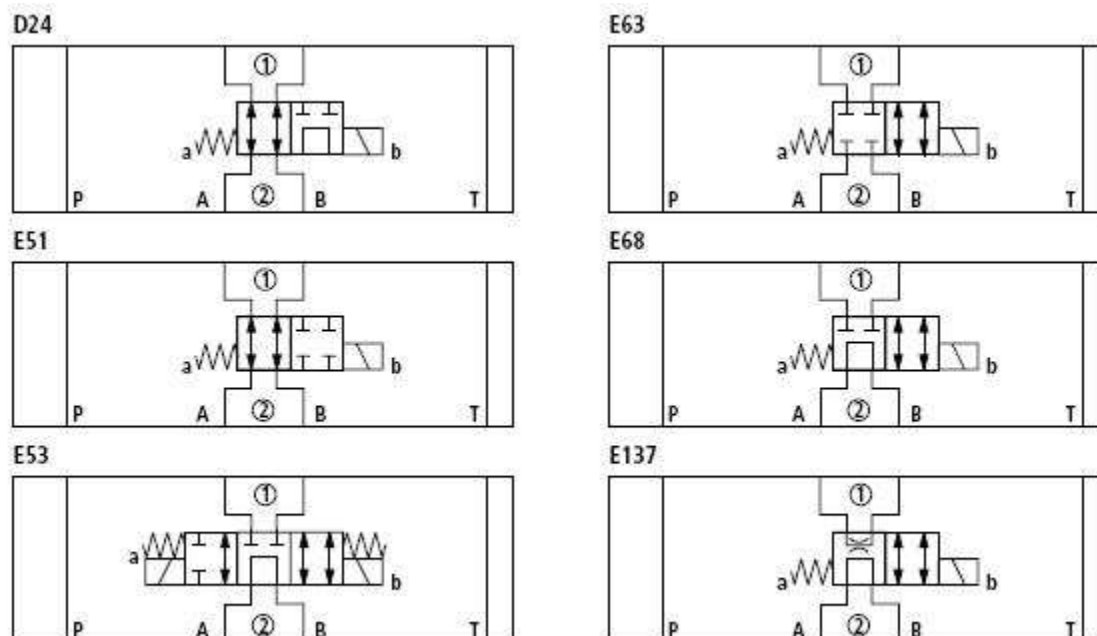
Obr. 99 Záznam polohy pístnice motoru při vypnutí servoventilu

První rychlost (r1) byla 0,1m/s, druhá (r2) 0,5m/s. Okamžik najetí na doraz není v záznamu zachycen, ale je patrný ze zlomu křivek skutečných poloh, které přestanou sledovat žádanou hodnotu a pístnice se dále pohybuje rychlostí danou průtokem přes nedokryté hrany šoupátka servoventilu. Ze záznamu je patrné, že rychlost po odpojení servoventilu nezávisí na původní rychlosti pohybu. U motoru číslo 4, na kterém bylo toto měření provedeno, je 0,02m/s. Pokud by současně s odpojením servoventilu byl odpojován i napaječ a předpokládali bychom jeho průměrnou reakční dobu 604ms (viz minulá kapitola), došlo by po vzniku havarijního signálu k úplnému zastavení pohybu během přibližně 12mm posuvu. To je již dostatečná rychlost

brždění a tato metoda se tedy jevila jako vhodná. Pro její uplatnění v praxi bylo potřeba proměřit chování všech motorů, protože různé servoventily se mohou chovat různě a dále ověřit, zda zachování původního směru pohybu je obecný jev, nebo je to jen náhoda u servoventilu na motoru číslo 4. Dále pak pochopitelně ověřit i špičky zrychlení, které budou vznikat odpojením servoventilu. Dříve než k těmto dalším měřením došlo, byla však tato varianta i přes optimistické závěry tohoto měření opuštěna. Proti totiž stály dvě skutečnosti. První z nich je porušení zásady nezávislosti bezpečnostního systému. Kdyby totiž byla příčinou poruchy mechanická závada servoventilu (například šoupátko zadřené vlivem nějaké nečistoty v otevřené poloze), nebylo by pohybu čím zpomalit a během reakční doby napaječe by mohlo dojít k nárazu pístnice na konec dráhy. Druhou skutečností byl fakt, že po takovémto zastavení pohybu zůstávala plošina stát v náhodné poloze (tedy například i „velmi šikmo“), což by znesnadňovalo „vystoupení“ testované osoby. Proto bylo současně s tímto měřením hledáno s dodavatelem servoventilů i jiné řešení. Tomu pak byla dána přednost, takže další měření servoventilů jsem již neprováděl. Zvolená metoda je posána v následující kapitole.

#### 4.2.4. Odpojovač Rexroth Z4WE 6

Firma Rexroth má totiž ve své nabídce rychlé odpojovací ventily. Jsou to v podstatě dvupolohové elektricky ovládané uzavírací ventily. Kompletní popis ventilu je uveden na webových stránkách výrobce [22], zde uvedu jen některé údaje. Nejdůležitější je pochopitelně reakční doba při vypnutí. Ta je udávána v rozmezí 10 až 25ms. I při nejpomalejší době a rychlosti pohybu 1m/s to představuje maximálně 25mm dráhy, což je pro plošinu vyhovující údaj. Průtok 40l/min je dostatečný pro jeden motor, předpokládá se tedy použití samostatných ventilů pro každý z motorů. Ventil se vyrábí v různých provedení šoupátka, která jsou vidět na obrázku 100.

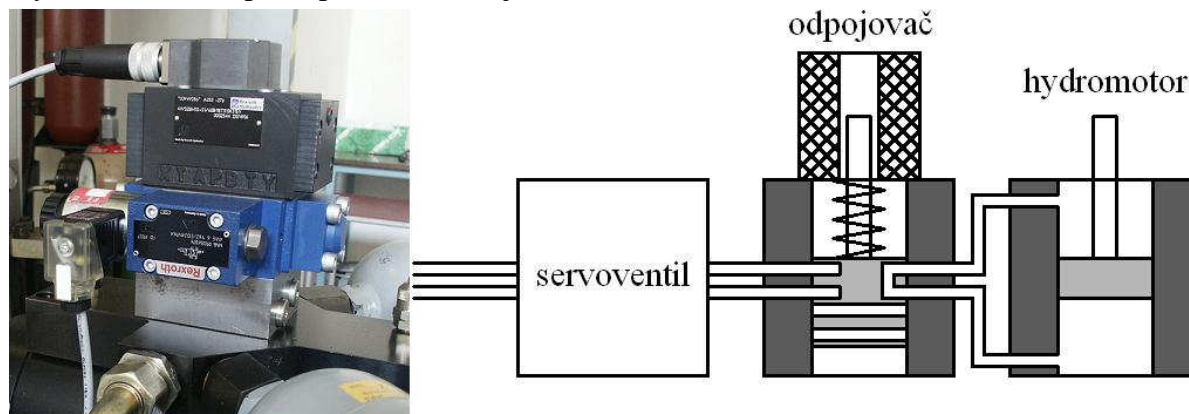


**Obr. 100** Varianty provedení ventilu Z4WE 6

Pro použití na plošině bylo vybráno provedení E68. To má odpovídající logiku ovládání bezpečnostním systémem – tedy bez napájení uzavřeno. Ve vypnutém stavu uzavře na vstupní straně přívod hydraulické kapaliny a na výstupní straně propojí výstupy zkratem. To v podstatě znamená volný průtok kapaliny na výstupní straně. Toto provedení zajišťuje, že po odpojení ventilu nedojde k „zakousnutí“ pístnic, ale volný průtok kapaliny naopak pístnici



uvolní a ta se bude moci dále volně pohybovat vlivem setrvačných sil. Pohyb bude dobržděn třením. Tím by mělo být nouzové zastavení maximálně plynulé, bez špiček zrychlení. Výsledné řešení a principiální schéma je na obrázku 101.



**Obr. 101 Skutečná montáž a princip zapojení odpojovacího ventilu**

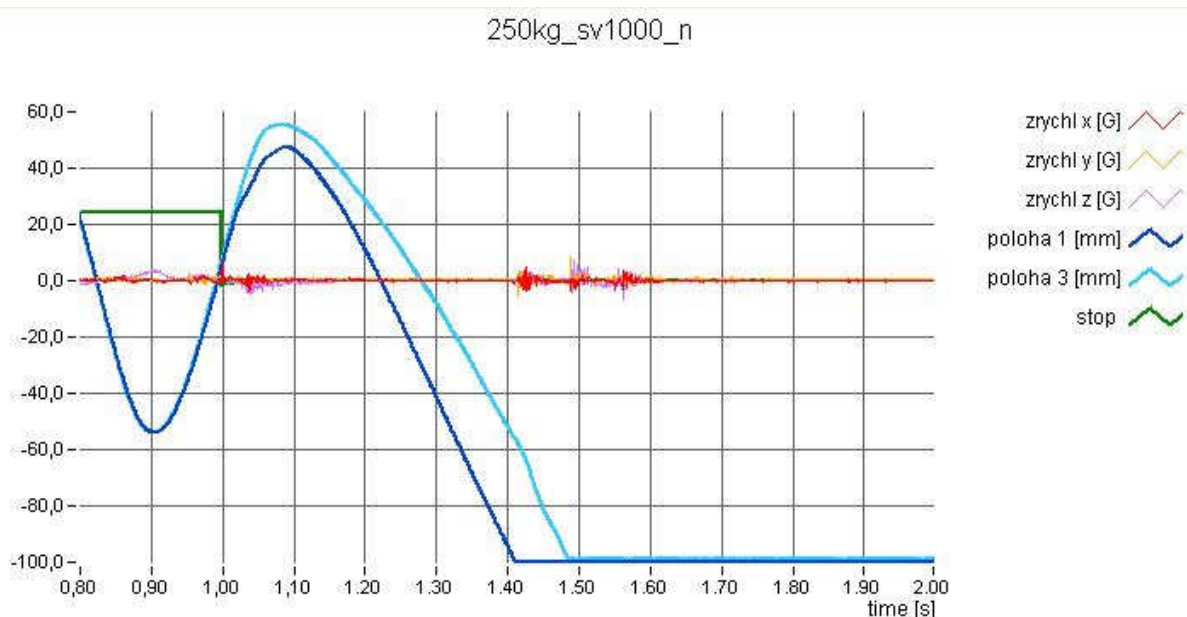
Na fotografii v levé části obrázku je vidět modrý odpojovací ventil vložený mezi hydromotor a servoventil. Toto uspořádání je shodné na všech šesti hydromotorech. Pokud je odpojovací ventil bez napájení, uzavře přívody kapaliny od servoventilu a zkratuje vstupy hydromotoru, čímž je pístnice uvolněna pro pohyb od vnější síly. V praxi se to projeví tak, že v okamžiku vypnutí odpojovačů plošina vlastní vahou sjede do dolní polohy, kde se zastaví. Tím je vyřešen problém s vystoupením testované osoby, plošina stojí vodorovně v nejnižší poloze. Tuto činnost bylo pochopitelně třeba ověřit a proto jsem provedl celou řadu měření chování plošiny při vypnutí odpojovacích ventilů. Uspořádání měření se podobalo předchozím. Opět byla zaznamenávána poloha pístnic paralelním odměřováním a současně bylo pomocí akcelerometrů Techlab zaznamenáváno i zrychlení ve třech osách. Jako budící signál byl zvolen harmonický signál a porucha byla generována pomocí upravené aplikace *pl\_reg*. Úprava umožňovala vygenerovat poruchu (tedy vypnout odpojovací ventily) v přesně definovaném okamžiku harmonického signálu. Měření jsem prováděl s různou hmotností naloženou na plošinu. Panovala totiž obava, že po uvolnění pístnice vypnutím ventilů dojde při velkých hmotnostech a rychlostech vlivem setrvačných sil k nárazu na konec dráhy. Na obrázku 102 jsou vidět 50ti kilogramová závaží naložená na plošinu a snímače zrychlení ve třech osách pohybu.



**Obr. 102 Zátěž na plošině a snímače zrychlení**



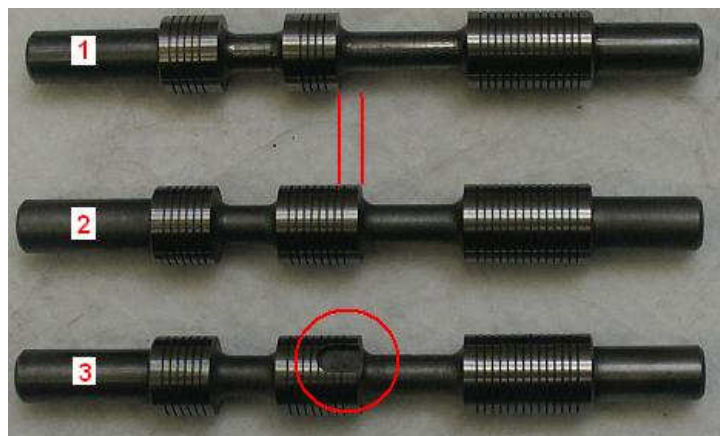
Pro tato měření byla vlastní plošina nahrazena křížem z ocelových profilů, na který byla kotvena závaží. Měření jsem prováděl pro hmotnosti 50, 150 a 250kg, což odpovídá prázdné a středně a plně zatížené plošině. Amplituda a frekvence harmonických signálů byla zvolena tak, aby maximální rychlost pohybu byla 0,1, 0,5 a 1m/s. V okamžiku této maximální rychlosti byly odpojeny ventily. Měření probíhalo odděleně pro vodorovné a svislé pohyby. Pro svislé pohyby jsem navíc provedl záznam při pohybu směrem dolů a vzhůru. Měření jsem provedl opět celou řadu, ale pro popsání chování plošiny po odpojení ventilů stačí pouze následující.



**Obr. 103 Záznam chování po odpojení ventilů**

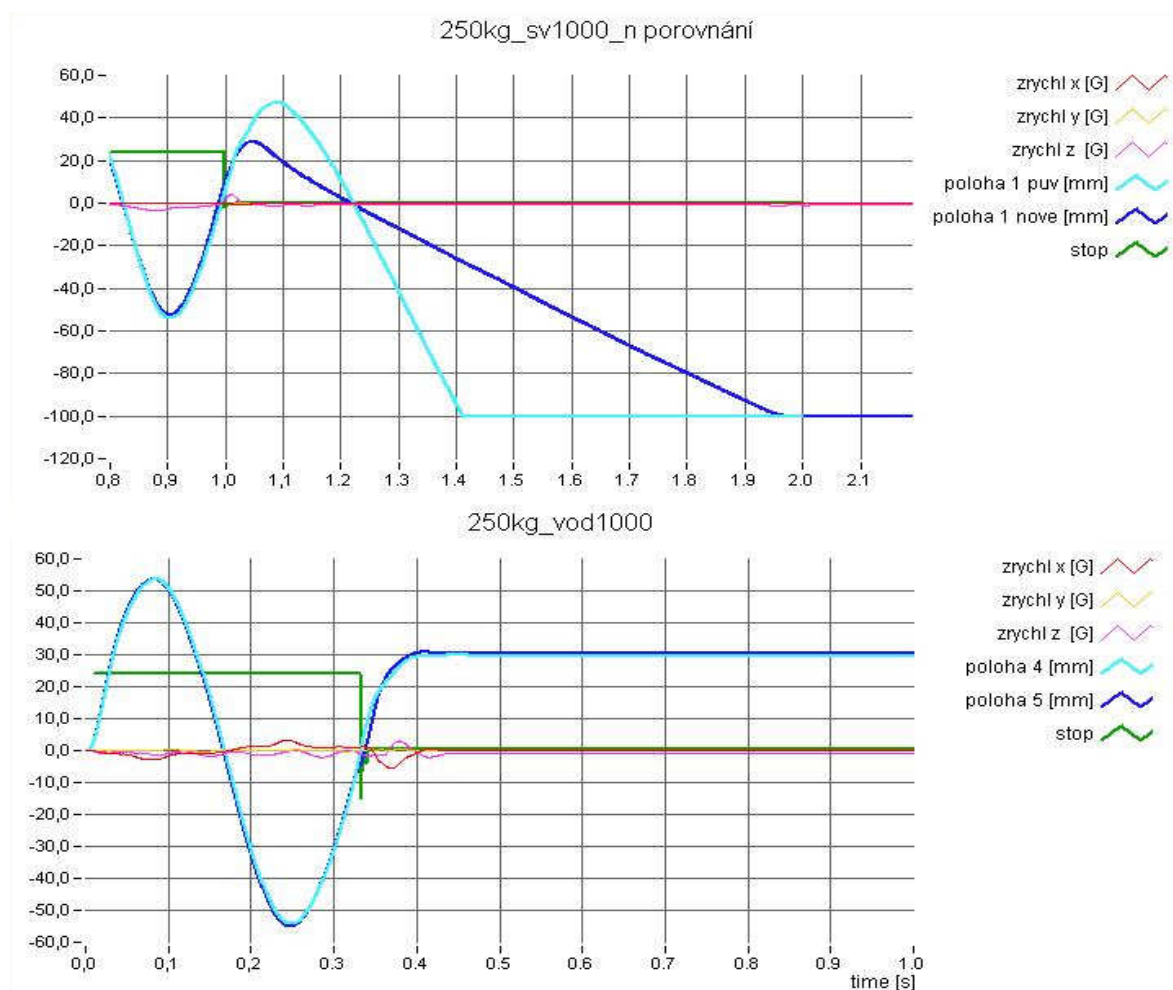
Na obrázku je záznam při extrémních hodnotách, tedy zátěži 250kg a rychlosti 1m/s. Vypnutí ventilu bylo provedeno v čase 1s při pohybu směrem vzhůru. Na záznamu polohy jsou vidět průběhy dvou svislých válců. Ze záznamu je patrné, že vlivem setrvačných sil dojde i proti gravitaci k překmitnutí téměř o 60mm, pak se pohyb vlivem gravitace otočí a plošina působením gravitace dopadne na spodní doraz značnou rychlostí – cca 0,5m/s. Všechny ostatní směry jsou na tom podobně. O něco hůře je na tom pochopitelně vypnutí při pohybu dolů. Dopadová rychlost je pak přibližně 0,8m/s. Ve vodorovných směrech nepůsobí proti setrvačným silám gravitace, takže je překmit větší. K otočení směru pohybu pochopitelně nedojde, ale při shodně extrémních podmínkách je překmit téměř 100mm, takže dochází k nárazu na konec dráhy ve směru pohybu. Při méně extrémních podmínkách, tedy menší hmotnosti nebo rychlosti, jsou výsledky pochopitelně příznivější. Ze záznamu zrychlení je vidět, že nejhorší je právě dopad, vypnutí ventilu je zanedbatelné. Výsledky těchto měření ukázaly, že volba ventilů v tomto provedení naplňuje předpoklad plynulého odpojení hydraulické energie. Bohužel ale třecí síly v motorech nestačí dostatečně rychle následně brzdit setrvačný pohyb.

Další řešení již bylo v kompetenci hydraulikářů v našem týmu, já jsem se podílel jen na dalších ověřovacích měřeních. Protože jsem zde ale problém nastínil, stručně popíši i jeho řešení. To spočívalo v nápadu brzdit pohyb nejen třením, ale i hydraulicky, omezením zkratovacího průtoku. Praktická realizace tohoto kroku ale nebyla tak jednoduchá. Pokud se podíváme znovu na obrázek 100, je z hydraulického zapojení patrné, že škrcení nejde zabudovat nikam mimo ventil. Všechna připojení jsou použita i při normální funkci, kdy je jakékoliv omezení průtoku pochopitelně nepřijatelné. Škrcení se musí proto odehrát přímo ve ventilu a konkrétní provedení bylo proto konzultováno přímo výrobcem ventilů. Jeho princip je vidět na následujícím obrázku.



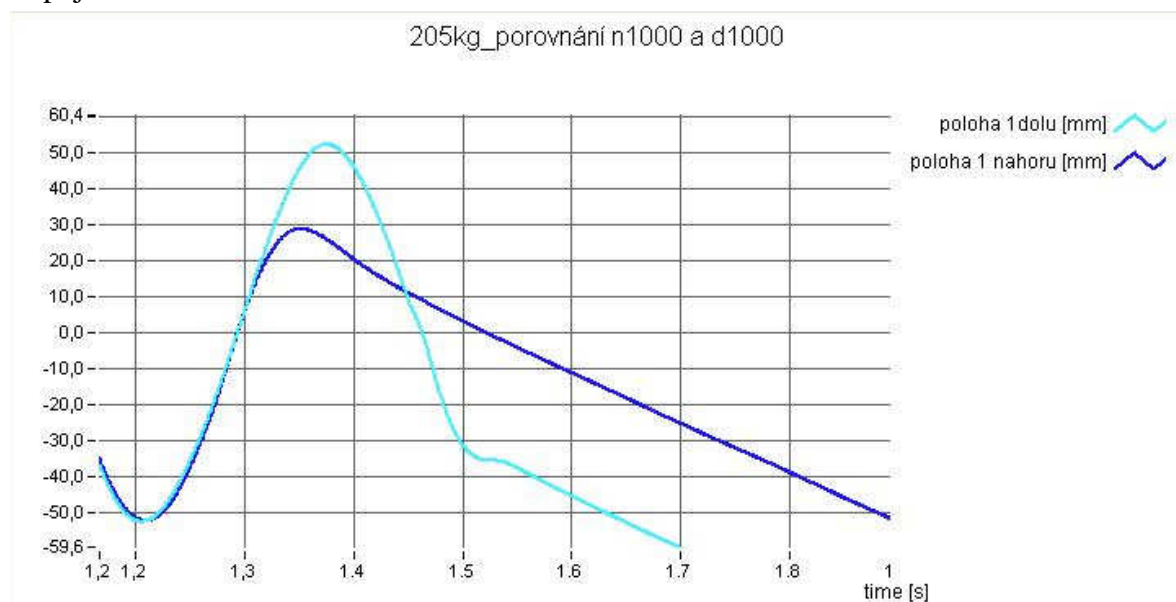
Obr. 104 Šoupátka odporovacího ventilu

Pod číslem 1 je šoupátko z ventilu, který zkratovává výstup při vypnutí, pod číslem 2 šoupátko z ventilu, který výstup natvrdo uzavře. Zkratovací průtok je tedy umožněn kratší délkou střední části šoupátka a jeho velikost dána právě rozdílem délek. Protože výroba několika kusů šoupátek s jinou délkou střední části by byla finančně neúnosná, bylo upraveno standardní šoupátko č.2. Úprava je vidět na šoupátku 3. Do střední části byla vyrobena drážka, jejíž průřez určuje velikost zkratovacího průtoku. Takto upravená šoupátka byla namontována do odpojovacích ventilů. Na mě bylo poté opět shodnou sadou měření ověřit vhodnost této úpravy. Výsledek mnoha měření budu demonstrovat jen třemi grafy.



Obr. 105 Grafy průběhů s upravenými šoupátky

Záznamy opět představují extrémní podmínky, tedy 250kg zátěž a rychlost 1m/s. Na horním grafu je porovnání chování válce 1 s původním a upraveným šoupátkem. Upravené šoupátko snižuje překmit na cca 30mm a po otočení směru je dopadová rychlost na spodní doraz přibližně 0,13m/s. Záznam zrychlení je již pro nové šoupátko a je vidět, že dopad prakticky není zaznamenán. Na dolním grafu je ukázka chování ve vodorovné poloze opět při shodných podmínkách. Zde je vidět prakticky ideální zastavení, zrychlení se chová velice mravně a překmit je opět na hranici 30ti milimetrů. I kdyby tedy došlo k odpojování až vlivem polohové ochrany  $\pm 70\text{mm}$ , je těch 30mm prakticky přesně, takže dojde k maximálně lehoučkému nárazu na konec dráhy. Při většině experimentů s člověkem bude celková hmotnost plošiny nižší než 250kg, protože prakticky žádná sedačka nemá 100kg (250kg vzniklo součtem 50kg plošina, 100kg sedačka a 100kg člověk). I rychlost 1m/s při testech z člověkem je prakticky nedosažitelná, takže i setrvačné účinky hmoty a tím i překmit bude v praxi menší. Poslední záznam, který zde uvedu, bude ten vůbec ten nejhorší možný případ, tedy 250kg a 1m/s odpojený při svislém pohybu dolů. Na grafu je porovnání motoru 1 odpojeného ve směru nahoru a dolů.



**Obr. 106 porovnání odpojení svisle nahoru a dolů**

V grafu jsou tedy sloučeny záznamy dvou měření – nahoru a dolů a pro názornost jen pro jeden válec. Odpojení bylo vždy při průchodu signálu nulou. Ze záznamu je vidět, že po cca 30ti milimetrech je ubržděn i pohyb dolů a dopadová rychlost je v obou případech prakticky shodná.

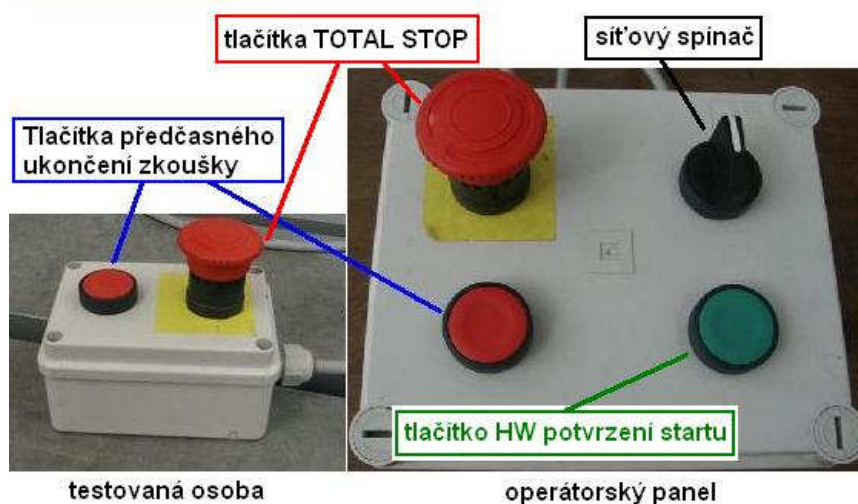
Výsledky měření s upravenými šoupátky jsou prakticky ideální. Velká pochvala patří hydraulikářům, velikost drážky v šoupátku spočetli přesně. Plošina se v případě zásahu odpojovacích ventilů chová velmi dobře. Pohyb je zastaven plynule, bez skoků rychlosti a přitom ubržděn v požadovaném prostoru. Poté plošina vlastní vahou sjede do dolní polohy, kde se zastaví. Aby se eliminoval i poslední náraz na spodní doraz, byl pod plošinu navíc vložen tlumicí element. Protože není zaručeno, že v okamžiku dosedání na tento element budou vždy vodorovné pohyby už nulové a podkladní deska je drážkovaná, mohlo by dojít při použití standardních dorazových hydraulických tlumičů k jejich ulomení vlivem vodorovných posuvů. Z tohoto důvodu byl použit jeden velkoplošný tlumicí prvek z polyuretanové pěny.

Odpojovací ventily Rexroth Z4WE6 se tedy ukázaly dobrou volbou a vyřešily problém odpojení hydraulické energie v případě havarijní situace. Odpojení je plynulé, přitom dostatečně rychlé a bezzbytku je naplněn i princip nezávislosti hlavního a bezpečnostního systému. Ten v okamžiku akce vypne odpojovací ventily na všech motorech a tím zastaví pohyb. Současně vypne i napaječe, aby se celý systém odpojil od hydraulického rozvodu.

### 4.3. KOMPONENTY BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU

#### 4.3.1. Tlačítka

Mezi základní komponenty každého bezpečnostního systému patří pochopitelně tlačítka pro ruční zastavení a odpojení systému. Tato tlačítka se povětšinou nazývají TOTAL STOP. Norma předepisuje jejich přímou dosažitelnost obsluhou zařízení a v případě testů s člověkem musí mít toto tlačítko k dispozici i testovaná osoba. V bodu E.3 přílohy E normy ČSN EN ISO 13090-1 se přímo uvádí: „Pokusná osoba musí mít možnost zastavit pohybový podnět ovládacím prvkem nouzového zastavení, zpravidla tlačítkovým vypínačem, který může být držen v ruce nebo umístěn v poloze, k níž má pokusná osoba okamžitý a snadný přístup. V závislosti na konstrukci zařízení může tento ovládací prvek spouštět buď nouzové zastavení, při kterém mohou některá zařízení produkovat poměrně vysoká přechodová zrychlení, nebo mírnější řízené zastavení, při kterém se pohybový podnět odstraní použitím vhodné funkce řídicího systému“. Z tohoto odstavce vychází i princip tlačítek nouzového zastavení na plošině. Jak operátor, tak testovaná osoba, mají k dispozici dvě tlačítka. První je skutečný TOTAL STOP, který okamžitě aktivuje bezpečnostní systém a ten vypne odpojovací ventily a napáječe. I když se přitom vzhledem k použité technologii odpojovacích ventilů negenerují žádná extrémní přechodová zrychlení (viz kapitola 4.2.4.), chtěl jsem dát testované osobě i možnost řízeného ukončení pohybu. K tomu slouží druhé tlačítko. To je sice také zpracováno bezpečnostním systémem, ale se zpožděnou tří sekundovou reakcí. Okamžitě je však zpracováno řídicím systémem – aplikací pl\_reg, která plynule utlumí pohyb a „zaparkuje“ plošinu řízeným způsobem (viz kapitola 3.2.5). Po uplynutí času pak reaguje i bezpečnostní systém odpojením všeho. Tady jsem troch váhal, zda je toto odpojení nutné, zda by nestačilo tato tlačítka obsluhovat jen řídicím systémem a nechat hydraulické obvody v činnosti. Pak jsem ale usoudil, že v eventuelně možném zmatku (např. při poruše typu prasklá hydraulická hadice) by mohlo dojít k záměně tlačítek a proto dojde k odpojení hydrauliky po použití obou. Aby záměna byla ale maximálně omezena, má každé tlačítko jiný tvar. Total stop má normou předepsaný hřibovitý knoflík, tlačítko pro ukončení zkoušky je klasické tlačítko. Testovaná osoba má jen tato dvě tlačítka, na operátorském panelu je ještě tlačítko pro hardwarové potvrzení startu (viz. kapitola 3.2.7) a síťový spínač celého zařízení (viz kapitola 3.1.5). Skutečné provedení tlačítek je na obrázku 107.

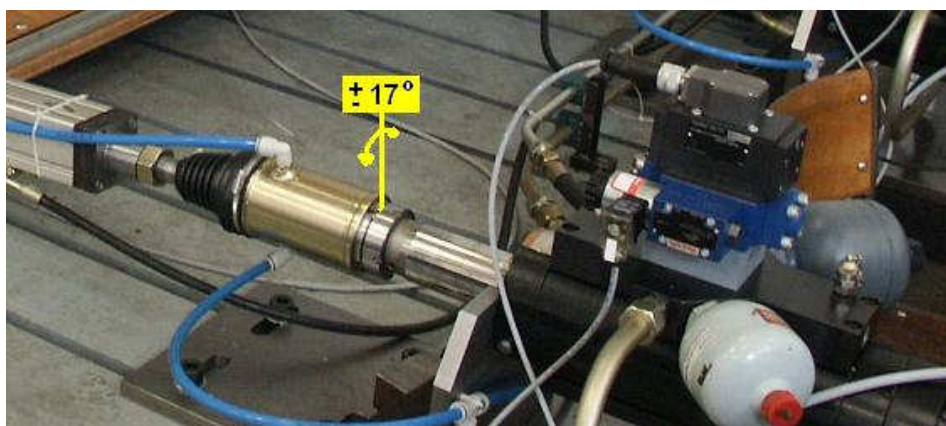


Obr. 107 Tlačítka



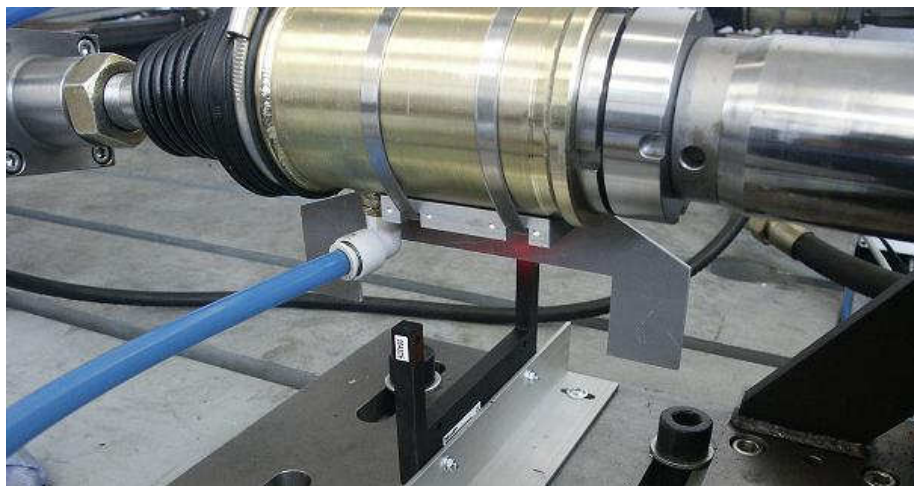
#### 4.3.2. Monitor překročení vymezeného zdvihu

Jak už bylo vícekrát uvedeno, je celkový zdvih pístnic  $\pm 100\text{mm}$ , ale pro praktickou činnost zařízení se používá jen  $\pm 70\text{mm}$ . Překročení tohoto vymezeného prostoru bylo zvoleno jako jedno z bezpečnostních kritérií. Pro detekci se nejprve uvažovalo s mechanickým řešením pomocí mikropsínačů. Tento princip se testoval společně se zkoušením použití servoventilů jako odpojovače a je vidět na obrázku 96 v kapitole 4.2.3. Během těchto testů se ukázaly všechny nevýhody mechanického řešení. Kotvení mikropsínačů bylo obtížné a nastavení přesné polohy vypnutí také. Navíc je potřeba zmínit jeden fakt, který možná není na první pohled patrný. Pístnice v motoru totiž nejsou nijak zajištěny proti rotaci podél své osy. U plošiny jejich rotaci omezují navazující kulové klouby, ale přesto je přibližně  $\pm 17^\circ$ .



Obr. 108 Rotace pístnice kolem osy

Vymyslet v tomto případě nějaké mechanické dorazy pro mikropsínače bylo docela obtížné. Proto jsem tento způsob poměrně záhy opustil a použil optické závory BGL 120A firmy Balluff. Toto řešení umožňuje „bezkontaktní“ hlídání zdvihu a eventuální rotace pístnice tedy nevadí. Řešení je na následujícím obrázku.

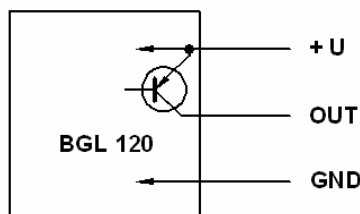


Obr. 109 Optická závora Balluff

Vidlicová závora je kotvena na pevnou konstrukci. Na pístnici je připevněn plech, jehož výřez určuje vymezený zdvih. Závora je dostatečně široká a plech dostatečně velký, takže eventuální natočení pístnice a tím i vychýlení plechu nijak neohrozí funkci. Závory pracují opět v požadovaném principu – „v klidu paprsek prochází“. Jakékoliv utržení kabelu nebo nečistotou zaslepená optika je tedy zpracováno jako porucha. Vzhledem k vidlicovému provedení se závora nemusí nijak opticky ladit, na pouzdrě se jen doladí trimrem citlivost a nastaví režim spínání výstupního tranzistoru. Zde se dá volit, zda tranzistor sepne při průchodu nebo začlenění paprsku. Pro bezpečnostní systém jsem zvolil variantu „sepnuto při

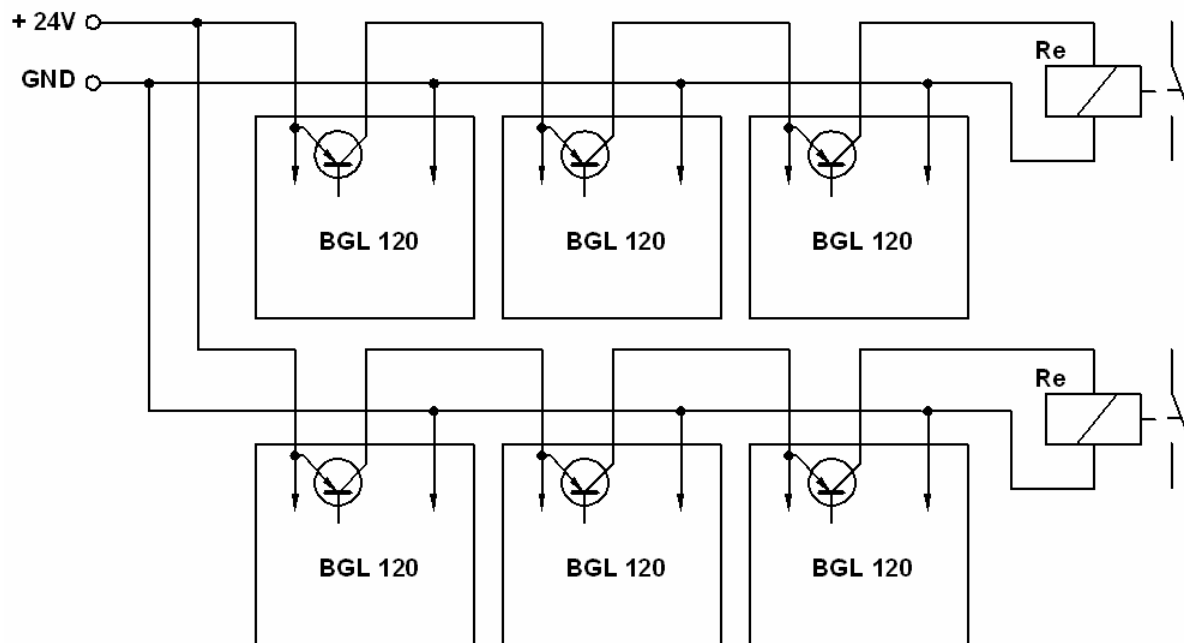


průchodu“. Výstupní tranzistor lze volit typu NPN nebo PNP. Pro zapojení u plošiny jsem objednal typ s tranzistorem PNP. Úplný technický popis je v katalogovém listu výrobce [23], já zde uvedu jen princip připojení čidla, ze kterého se pak odvíjí jejich zapojení v bezpečnostním systému.



Obr. 110 Zapojení optické závory BGL

Závora pracuje v široké oblasti napájecího napětí 15 až 30V. Pro jejich provoz lze tedy přímo použít napájení 24V, které je u plošiny použito. Výstup je při sepnutí tranzistoru připojen na napájení, ale na tranzistoru může být dle katalogu výrobce úbytek až 2V. Tento údaj jsem ověřil změřením a ukázal se jako pravdivý. Zapojení výstupu závory vůbec trochu komplikuje použití v bezpečnostním systému, který je koncipován jako sériově řazené kontakty. Aby byla splněna tato podmínka, bylo by potřeba k výstupu každé závory připojit relé a jeho kontakt pak zařadit do bezpečnostního systému. Vzhledem k šesti použitým závorám mi to však přišlo trochu náročné na množství relé. Proto jsem se rozhodl řadit závory sériově do samostatného okruhu a až na jeho výstupu použít relé. Tuto myšlenku jsem ale musel částečně korigovat. Vzhledem k úbytku 2V na každém výstupu by při šesti sériově řazených závorách celkový úbytek nezajišťoval spolehlivé napájení poslední závory. Proto jsem nakonec zapojit závory do dvou trojic a každá trojice spíná jedno relé, jehož kontakty jsou zařazeny do bezpečnostního systému. Výsledné zapojení tedy vypadá takto.

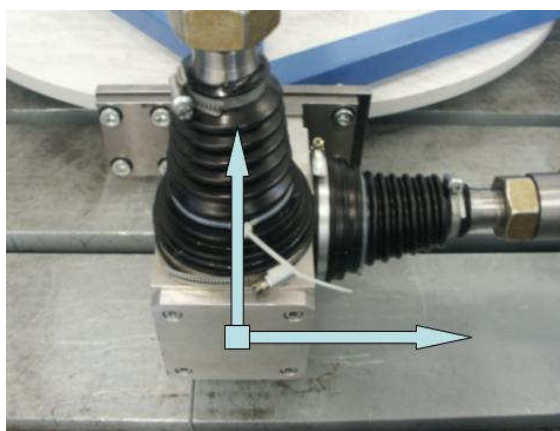


Obr. 111 Zapojení bezpečnostních závor BGL 120

Vodorovným motorům je přiřazena první trojice, svislým druhá. Od každé závory vede kabel do skříně výkonových obvodů, kde je na svorkovnici zajištěno propojení a relé jsou přímo umístěná mezi ostatními relé bezpečnostního systému. Jejich konkrétní zapojení bude uvedeno v celkovém schématu bezpečnostního systému.

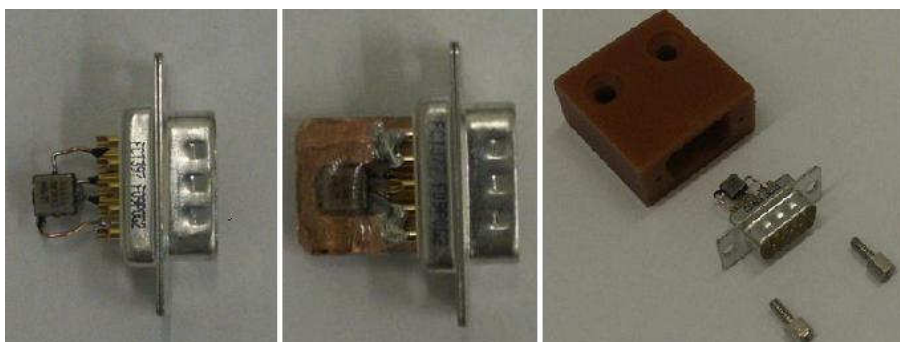
#### 4.3.3. Monitor zrychlení

Hlídaní překročení limitních hodnot zrychlení je důležitou součástí bezpečnostního systému. Dokáže totiž zjistit již zárodek nesprávné funkce a zastavit zařízení dříve, než dojde k velkému nárůstu rychlosti. U jednoosého buzení je situace jednoduchá, použije se jednoosý snímač zrychlení a jeho signál hlídá například jednoduchý komparátor úrovně. U víceosého buzení na plošině byl problém rozhodnout, kam a kolik akcelerometrů vlastně použít. O tomto problému se opět dlouze diskutovalo, aniž nakonec padlo definitivní rozhodnutí. Variabilita pohybů i testovaných zařízení je totiž tak velká, že lze dopředu asi opravdu těžko stanovit nějaké univerzální řešení. Jako zatím nejobecnější řešení se jeví hlídat zrychlení jednotlivých pístnic šesti lineárních motorů. Jako místo pro ukotvení akcelerometrů byl zvolen kulový kloub u plošiny, kde se vždy setkávají táhla od pístnic dvou kolmých motorů. Na každý tento kloub bude umístěn dvouosý akcelerometr, který bude měřit ve směrech táhel připojených pístnic hydromotorů.



Obr. 112 Kulový kloub s vyznačeným umístěním akcelerometrů

Z hlediska elektrického zapojení tedy půjde o tři dvouosé akcelerometry, tedy celkem o šest kanálů. Z široké škály akcelerometrů na trhu jsem opět sáhl pro již osvědčené řešení. Jím jsou jednočipové akcelerometry od Analog devices. Těch je opět celá řada a já jsem zvolil typ ADXL 203, což je dvouosý iMEMS akcelerometr v rozsahu  $\pm 1,7G$ . Napájecí napětí má 5V, citlivost 1V/G. Podrobné údaje jsou v katalogovém listu výrobce [24]. Akcelerometry jsou velmi odolné, i při tomto rozsahu vydrží až 3500G, takže je lze na plošině ponechat i při testech bez lidské posádky, kdy mohou dosahovaná zrychlení překročit jejich rozsah. Tyto akcelerometry jsou však dodávány bez jakéhokoliv krytí, takže před jejich použitím na plošině musely být nejprve zabudovány do krytů. Princip montáže do vyrobených krytů je na následujícím obrázku.

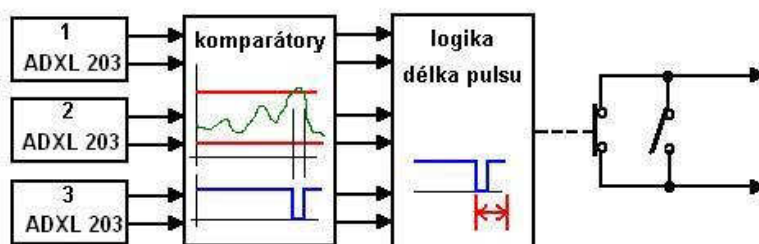


Obr. 113 Montáž akcelerometrů do krytů

Akcelerometr jsem nejprve připájel na konektor. Pro zvýšení mechanické odolnosti jsem pak čip podložil destičkou a celek zalil epoxidovou pryskyřicí. Tento díl pak vsunul do plastového pouzdra a upevnil montážními šrouby konektoru. Vznikl tak kompaktní celek, který lze

šrouby vedenými jeho otvory připevnit na kulový kloub. Do konektoru pak přijde propojovací kabel. Toto modulární řešení je velmi variabilní a jednoduše opravitelné.

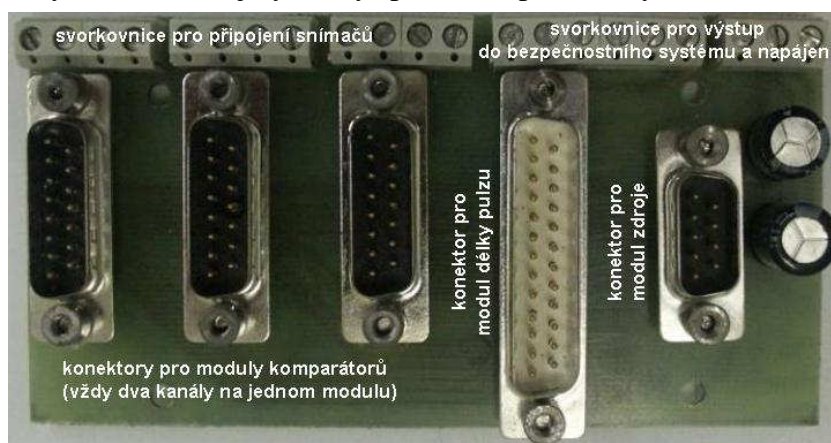
Akcelerometry dávají na výstupu analogový signál úměrný zrychlení. Pro potřeby bezpečnostního systému je tedy potřeba hlídat překročení úrovně tohoto signálu přes nastavenou mez. Jak už bylo výše řečeno, nemusí být toto rozmístění akcelerometrů konečné a konečné nemusí být ani použité typy snímačů. Proto je vyhodnocovací elektronika navržena modulárně, aby se daly jednoduše provádět eventuelní změny. Jediným pevným základem je maximálně šest vstupů, které se budou sledovat. Protože se jedná o jednoúčelový obvod, rozhodl jsem se pro vlastní návrh i realizaci celého elektronického obvodu. Sledování představuje hlídání překročení předem nastavených mezí, takže obvodové řešení je poměrně triviální, jde o jednoduchý komparátor úrovní. Princip vyhodnocovacího obvodu je tedy následující.



**Obr. 114 Princip vyhodnocovacího obvodu.**

Signál z každého akcelerometru je sledován dvojicí komparátorů. Pokud dojde k překročení úrovně, vyšle komparátor logický signál. Signály ze všech komparátorů zpracovává obvod kontroly délky pulzu, aby se odfiltrovaly zanedbatelně krátké pulzy. Pokud délka překročí nastavenou dobu, dojde k rozpojení kontaktu relé, který je zapojen do bezpečnostního systému. Logika opět odpovídá bezpečnostnímu systému, aby byl kontakt sepnut, musí vše fungovat, tj. obvod být napájen, všechny kabely zapojeny a signál akcelerometrů v předepsaných mezích. Protože se ale na plošině předpokládají i testy dílů bez člověka, lze celý obvod vyřadit z činnosti spínačem, který překlene kontakty výstupního relé. Tento stav je umožněn pouze po odemčení zámku na skříni elektroniky a je signalizován kontrolkou na skříňce komparátorů. Zároveň je tento stav čten řídicím softwarem a varování o vypnutí systému akcelerometrů je výrazně zobrazeno na monitoru operátora.

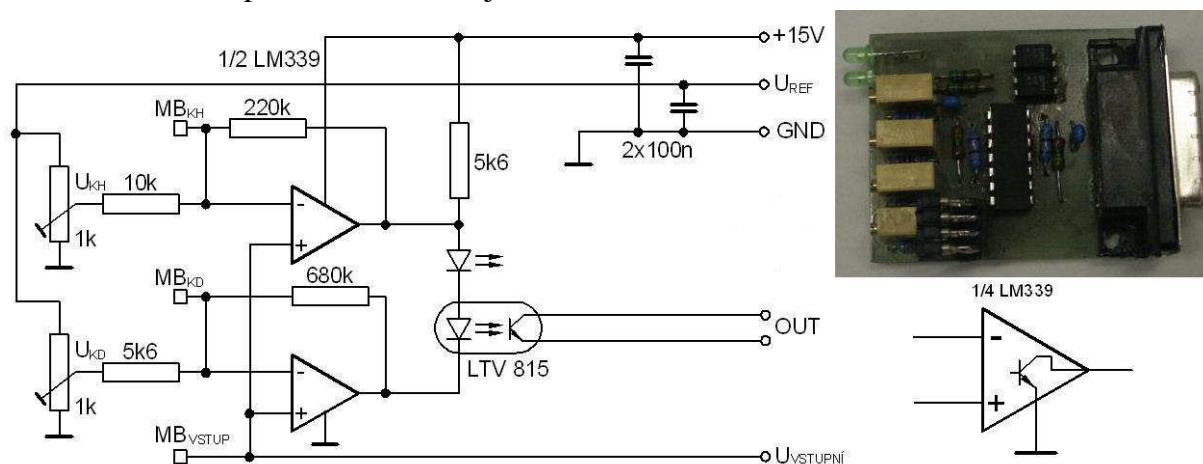
Skutečné provedení výše popsaného principu je založeno na již zmíněné modularitě a tím případné jednoduché změně, pokud by došlo k nějaké změně koncepce sledování hodnot zrychlení. Základ proto tvoří jednoduchá sběrnice se svorkovnicemi pro připojení kabelů a konektory pro jednotlivé moduly. Pokud by došlo k nějaké koncepční změně, lze jednoduše vyměnit některý z modulů za jiný, který splní nové požadavky.



**Obr. 115 Deska sběrnice s konektory a svorkovnicemi**

## Modul komparátorů

Základním obvodem vyhodnocovací elektroniky je modul komparátoru. Každý vstup je třeba hlídat dvěma komparátory na horní a spodní úroveň signálu odpovídající kladné nebo záporné hodnotě zrychlení. Akcelerometry v klidovém stavu dávají na výstupu polovinu napájecího napětí – tedy 2,5V. K této hodnotě se přičítá signál odpovídající zrychlení, takže při citlivosti 1V/G a rozsahu  $\pm 1,7G$  může být výstupní napětí v rozsahu 0,8 až 4,2V. Komparační úrovně budou nastaveny napevno pomocí trimrů. Jak už bylo výše uvedeno, rozhodl jsem se, že jedem modul bude zpracovávat dvojici signálů (jeden modul pro jeden dvouosý akcelerometr), takže na jednom modulu budou potřeba čtyři komparátory. Tomu odpovídá integrovaný obvod LM 339, který právě čtveřici komparátorů obsahuje. Parametry obvodu jsem čerpal opět z katalogového listu výrobce [25]. Obvod je dostupný v standardním pouzdře DIP14, takže je použitelný pro klasický ručně pájený tištěný spoj. Napájecí napětí je v širokých mezích 4 až 36V. Obvod porovnává úroveň napětí na dvou vstupech, pokud je napětí na  $+In$  větší než na  $-In$ , je výstupní tranzistor sepnut. Celkové schéma, které jsem navrhl, a skutečné provedení modulu je na obrázku 116.



**Obr. 116 Modul komparátorů**

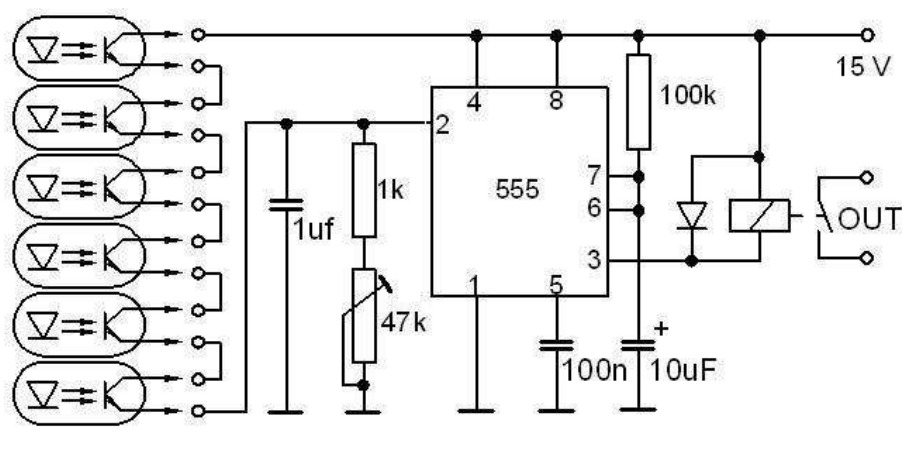
Na schématu je zapojení pro jeden vstup, reálný modul tedy obsahuje dvě tato shodná zapojení. V pravé části obrázku je skutečné provedení modulu a pod ním princip zapojení výstupního tranzistoru komparátoru LM339. Celý obvod se napájí +15V a ke své činnosti potřebuje ještě referenční napětí. Vstupní napětí z akcelerometru se přivádí na kladné vstupy dvou komparátorů, které mají na druhé vstupy přivedeno porovnávací napětí. To je odvozeno napěťovým děličem (trimrem) z referenčního napětí. Pokud je vstupní napětí v předepsaných mezích, je tranzistor horního komparátoru rozepnut a dolního sepnut - kontrolní LED i LED v optočlenu svítí. Tím je opět naplněn princip „v klidu vede“, jakákoliv porucha (výpadek napájení, atd.) nebo překročení některé z mezí způsobí zhasnutí LED, což je následně vyhodnoceno jako signál poruchy. Odporová síť okolo komparátorů zajišťuje hysterezi spínání. Na modulu jsou vyvedeny měřící body (MB), aby bylo možno jednoduše nastavit komparační hodnoty. Výstup je oddělen optočlenem z důvodu jednoduššího následného vyhodnocení a důsledného oddělení vyhodnocovacího obvodu od analogových signálů komparátoru. Tím je například zaručena i stabilita hysterezích úrovní odvozených od výstupních úrovní komparátorů.

## Modul délky pulzu

Úkolem tohoto modulu je zpracovat šest výstupních signálů z modulů komparátorů a odfiltrovat pulsy kratší, než nastavená mez. Pokud poruchový signál překročí nastavený čas, rozepne kontakt výstupního relé, který je již zapojen do bezpečnostních obvodů plošiny. Výstupem z modulů komparátorů je šest tranzistorů výstupních optočlenů. Tyto tranzistory

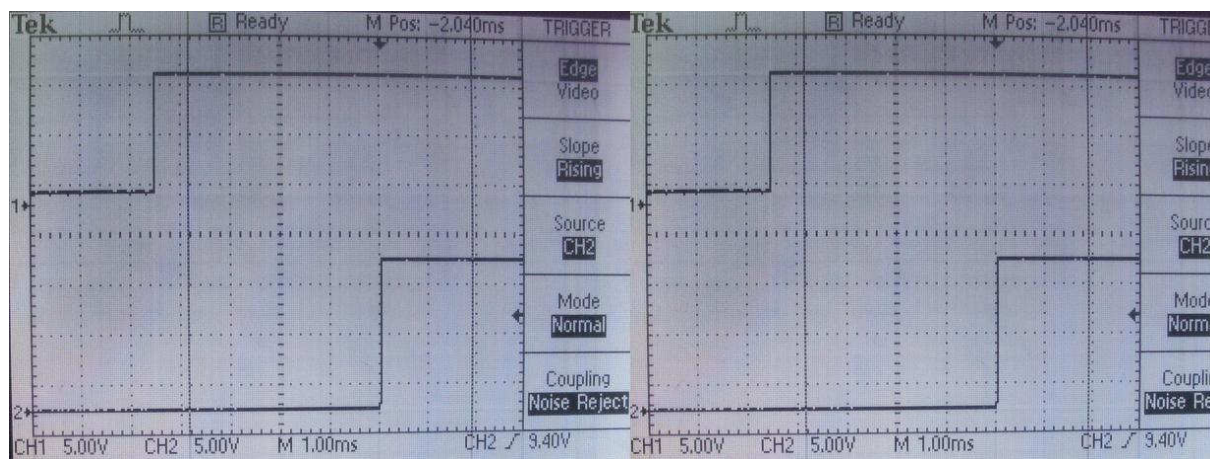


jsou sepnuty při normálním stavu, překročení mezí způsobí rozepnutí tranzistoru. Tato logika vede jednoznačně na sériové zapojení tranzistorů. Na schématu je pro názornost zobrazeno šest výstupních optočlenů z modulů komparátorů.



Obr. 117 Modul délky pulzu

Zapojení vychází z funkce, kterou tento obvod má plnit, tedy přizpůsobit délku pulzu. Pro takového obvodu existuje léty prověřený obvod, klasický časovač 555. Zde je zapojený jako monostabilní obvod. Pokud jsou všechny optočleny sepnuty, je na vstupu 2 napětí blízké napájecímu a časovač 555 je v klidovém stavu. Výstup 3 je v tomto stavu sepnut na zem a tím drží výstupní relé v sepnutém stavu, jeho kontakt je sepnut. Tím je dodržena podmínka „v klidu vede“. Jakmile se některý z optočlenů rozpojí, poklesne napětí na vstupu 2 k nule a na výstupu 3 se vygeneruje kladný pulz a relé odpadne. Jeho délka je asi 1s (je dána rezistorem 100k a kondenzátorem 10μF). Toto prodloužení pulzu je nutné vzhledem k navazujícím obvodům bezpečnostního systému. Relé v tomto modulu je s jazýčkovým kontaktem a je tedy velmi rychlé. Následné obvody jsou však již osazeny standardními relé a při testech se stávalo, že systém nereagoval na krátké pulzy, relé v bezpečnostním systému prostě nestihla odpadnout. Proto je nutné, aby odpadnutí kontaktu na výstupu tohoto modulu trvalo určitou dobu, nezávislou na délce vstupního pulzu. Tento modul by však měl také naopak odfiltrovat velmi krátké pulzy, vzniklé možnými záchvěvy snímačů zrychlení. To je zde vyřešeno na vstupu zapojeným kondenzátorem 1μF. Ten po rozpojení optočlenů podrží na vstupu 2 napětí. Délka závisí na hodnotě rezistoru, kterým se tento kondenzátor vybíjí, dá se tedy nastavit pomocí trimru. Zmenšováním jeho odporu se doba pochopitelně zkracuje. Funkčnost a opakovatelnost tohoto filtru byla pochopitelně ověřena měřením, příklad je na obrázku 118.

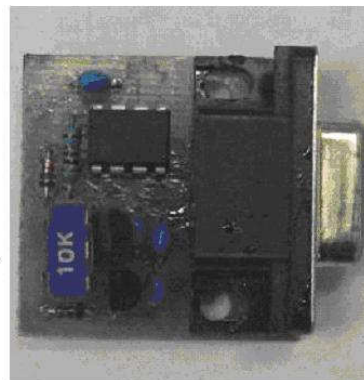
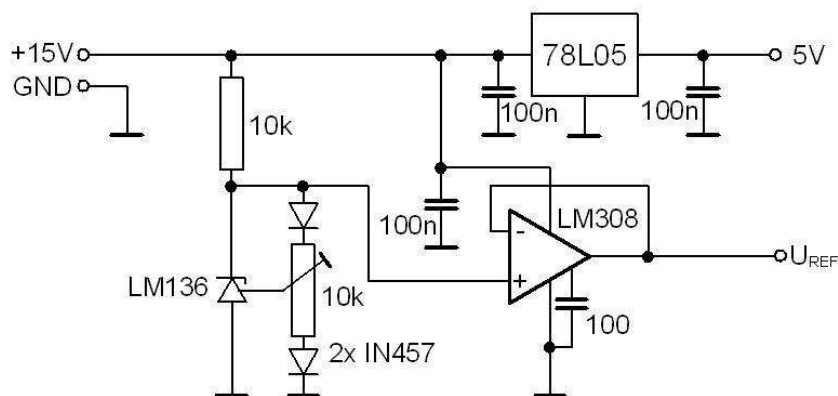


Obr. 118 Měření funkčnosti modulu délky pulzu

Z obrázku je vidět dobrá opakovatelnost času mezi zhasnutím optočlenu (horní křivka) a odezvou na kontaktu relé (dolní křivka). Mnoho dalších měření potvrdilo, že toto triviální řešení pro potlačení krátkých pulzů je naprosto spolehlivě funkční. Pomocí trimru lze dobu nasatvit v celkem širokých mezích a doladit tak funkci při praktických testech tak, aby monitor zrychlení reagoval správně. Prodloužení pulzu je nastaveno konstantně, nedá se nijak ladit. Nastavená hodnota spolehlivě postačuje pro odpojení následných relé bezpečnostního systému a to je vše, co se od prodloužení doby pulzu očekává.

### Modul zdroje

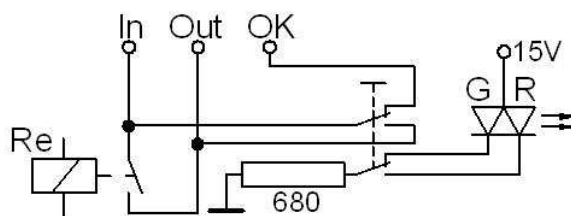
Napájení celého monitoru zrychlení je přivedeno ze symetrického zdroje  $\pm 15V$ , který je použit pro napětově proudové převodníky (viz kapitola 3.1.3). To vyhovuje všem obvodům v monitoru zrychlení s výjimkou snímačů ADXL 203. Ty potřebují napájení pouze 5V. Pro nastavení komparačních úrovní je pak potřeba ještě stabilní (referenční) napětí, které napájí výhradně jen odporové děliče pro nastavení úrovní. Vzhledem k výstupnímu rozsahu akcelerometrů je i toto napětí 5V. Modul zdroje dodává obě potřebná napětí.



**Obr. 119 Modul zdroje**

Napájení 5V pro snímače zrychlení je získáno klasickým třísvorkovým stabilizátorem 78L05. Pro referenční zdroj jsem použil napětovou referenci LM136. Trimrem lze doladit přesnou hodnotu napětí. Napětí pro děliče je od této reference výkonově odděleno operačním zesilovačem LM308. Zapojení vychází z doporučení v katalogovém listu výrobce [26].

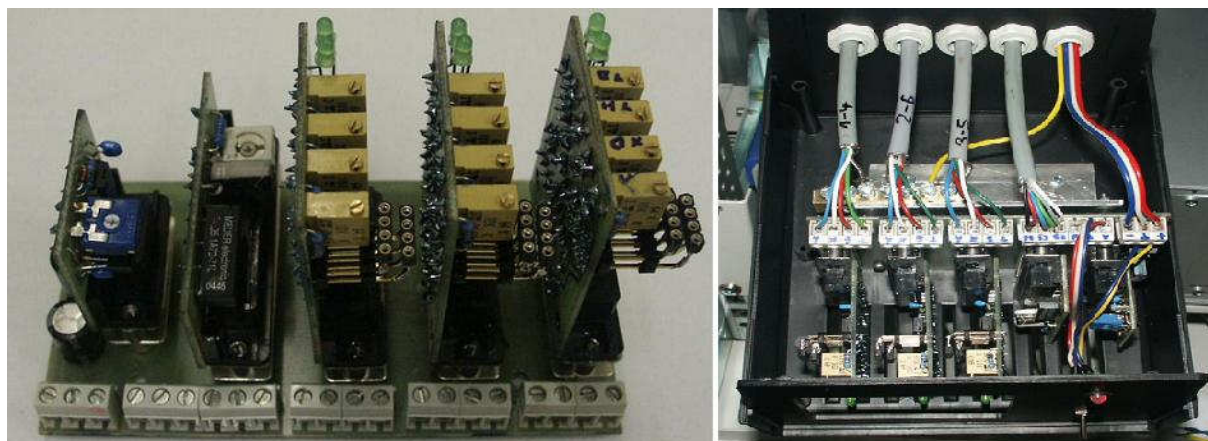
Tím je popis obvodů prakticky vyčerpán. Zbývá se zmínit o způsobu vyřazení tohoto monitoru z činnosti pro testy bez lidské posádky. To je tvořeno jednoduše přepínačem, který překlene kontakt na modulu délky pulzu. O tomto překlenu informuje jednak LED dioda na skříňce monitoru zrychlení a další informace vede do bezpečnostního systému, který ji předá řídicímu softwaru. Přepínač i LED dioda jsou připojeny ke svorkovnicím desky sběrnice.



**Obr. 120 Princip vyřazení monitoru zrychlení**

Pokud je přepínač v naznačené poloze, signál z bezpečnostního systému projde ze svorky In na svorku Out jen přes kontakt relé (relé modulu délky pulzu) – monitor je tedy v činnosti. Informace pro software o činnosti monitoru je ve formě propojení napětí ze svorky In na svorku OK. Zároveň svítí dvoubarevná LED na panelu zeleně. Po přepnutí přepínače se kontakt relé překlene a tím se monitor vyřadí z činnosti. Informační napětí ze svorky OK se ztratí a LED svítí červeně.

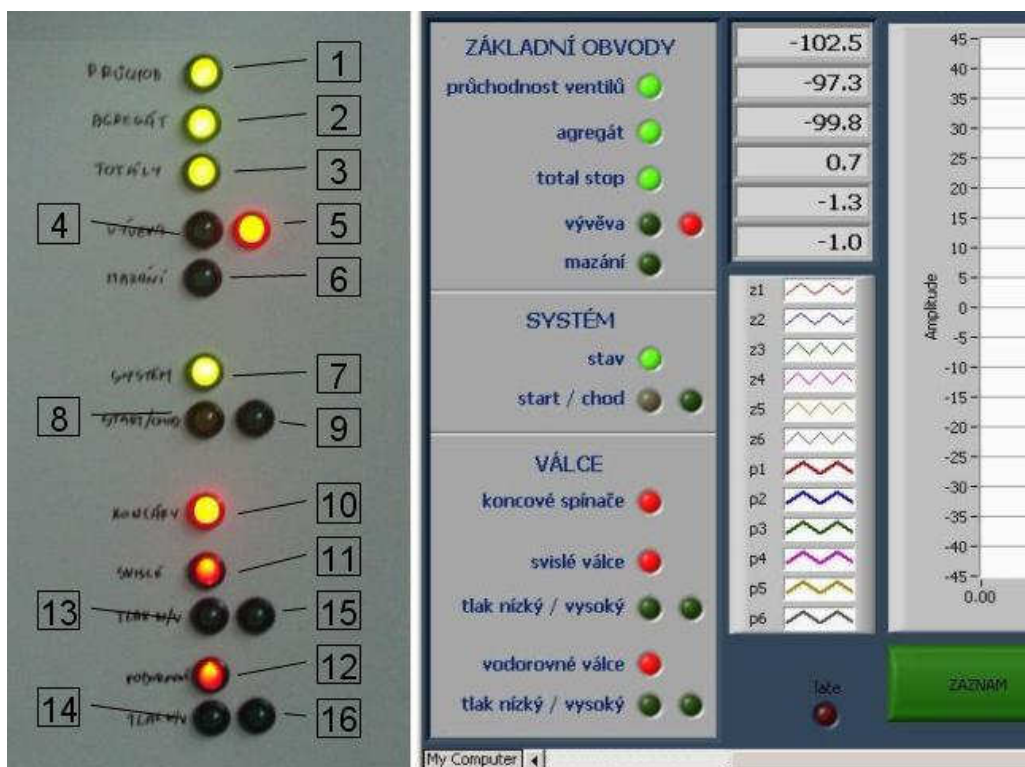
Na obrázku 121 je pohled na desku sběrnice s moduly a kompletní monitor zrychlení připojený k obvodům bezpečnostního systému.



Obr. 121 Finální provedení monitoru zrychlení

#### 4.3.4. Informační systém

Norma předepisuje jednoznačnou informovanost operátora o stavu jednotlivých obvodů řídicího systému. Jedná se hlavně o signalizaci zapnutí jednotlivých výkonových obvodů a stav zabezpečovacích prvků. V ovládacím systému plošiny tuto úlohu řeší bezpečnostní systém dvěma paralelními zobrazovači. Prvním je panel kontrolky přímo na skříni rozvaděče a druhým je tatáž informace zobrazená přímo na monitoru operátorského PC – o zobrazování se stará aplikace pl\_display (viz kapitola 3.2.10). Obě zobrazovací místa jsou shodná rozmístěním i barvou signálních prvků.



Obr. 122 Panel kontrolky (vlevo) a část okna aplikace pl\_display (vpravo)

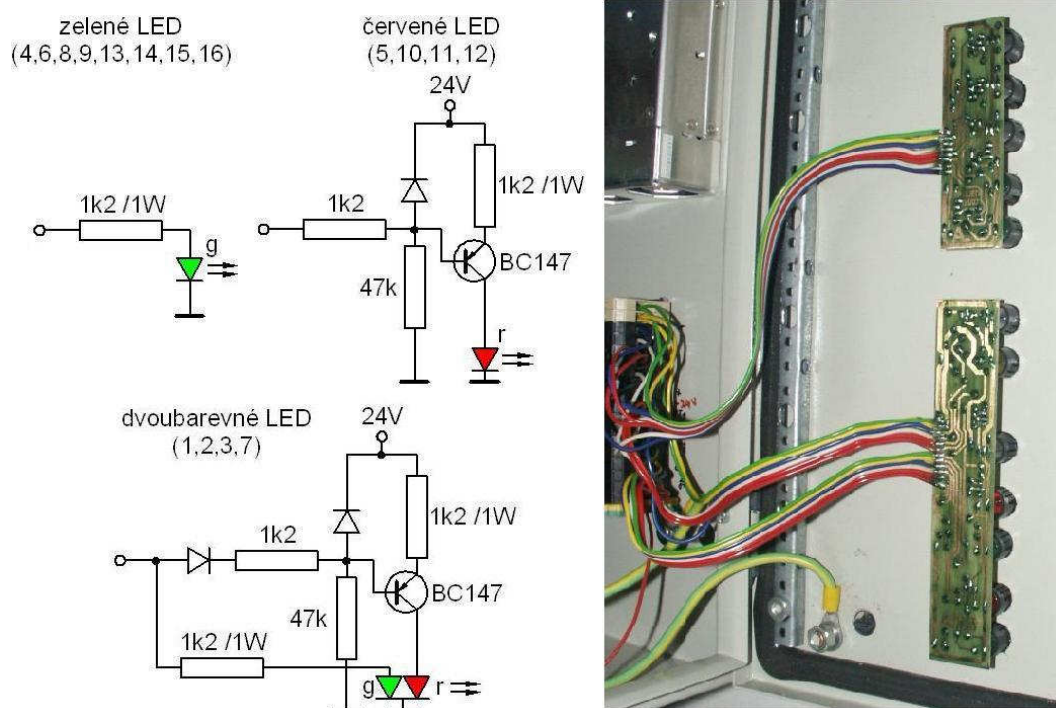
Na obrázku 122 je ještě starší fotografie panelu kontrolky s provizorním popisem významu. V současné době již text popisu odpovídá textu v aplikaci pl\_display. Panel kontrolky zobrazuje následující informace:



číslo	informace	kontrolka	v chodu v pořádku	vypnuto porucha	význam
1	průchodnost ventilů	dvoubarevná	svítí zeleně	svítí červeně	otevření vstupních hydraulických mechanických ventilů
2	agregát	dvoubarevná	svítí zeleně	svítí červeně	činnost hydraulického agregátu
3	tlačítka TOTAL STOP	dvoubarevná	svítí zeleně	svítí červeně	stav tlačítek TOTAL STOP
4	vývěva	zelená	svítí	zhasnuto	zapnutí motoru čerpadla odsávání
5	ochrana motoru vývěvy	červená	zhasnuto	svítí	stav motorové ochrany motoru čerpadla odsávání
6	mazání	zelená	svítí	zhasnuto	zapnutí ventilu mazání
7	systém	dvoubarevná	svítí zeleně	svítí červeně	stav obvodu WATCHDOG řídicího systému
8	start	žlutá	svítí	zhasnuto	signalizace vyjždění z parkovací polohy bez hlídání mezi polohy sníženým tlakem
9	chod	zelená	svítí	zhasnuto	plošina v chodu, všechny ochrany zapnuty, provoz s plným tlakem
10	koncové spínače	červená	zhasnuto	svítí	signalizace překročení hranic polohy
11,12	svislé válce vodorovné válce	červená	zhasnuto	svítí	signalizace sepnutí odpojovacích ventilů
13,14	tlak nízký	zelená	svítí	zhasnuto	signalizace zapnutí ventilů nízkého tlaku v napájecích
15,16	tlak vysoký	zelená	svítí	zhasnuto	signalizace zapnutí ventilů vysokého tlaku v napájecích

Z tabulky je vidět, že informace o chodu nebo správném stavu jsou zobrazovány zeleně, poruchy červeně. Některé informace jsou „jednobarevné“ příslušná LED buď svítí nebo je zhasnuta, jiné svítí vždy a červenou nebo zelenou barvou signalizují poruchu nebo správnou činnost příslušného zařízení. Reálné kontrolky jsou tvořeny LED diodami o průměru 10mm. Ty jsou pájeny do desek plošných spojů a uchyceny na dveřích rozvaděče. Informační signál z bezpečnostního systému je představován napětím 24V. Přítomnost napětí signalizuje chod nebo správnou činnost zařízení, nepřítomnost vypnutí nebo poruchu. Z toho vyplývá, že zapojení zelených LED diod je triviální, LED svítí za přítomnosti napětí. U červených diod bylo třeba vyřešit „invertování“ signálu, protože červená LED svítí v případě poruchy, tedy při nepřítomnosti napětí na signálním vodiči. V první variantě jsem na tuto funkci použil operační zesilovače, což se neukázalo jako nejlepší. V rozvodu 24V vznikají vlivem rozpínání indukčních zátěží (cívek relé i ventilů) napěťové špičky, které měly zhoubný vliv na použité operační zesilovače. Ochrana vstupů zesilovač je sice jednoduchá, ale znamenala by stejně předělat desku tištěných spojů s diodami. Proto jsem nakonec rozhodl přetvořit zapojení kompletně a místo operačních zesilovačů jsem použil obyčejné tranzistory. Ty se mi jevily odolnější proti výše popsaným špičkám a dlouhodobá bezporuchová činnost tuto domněnku plně potvrdila. Zapojení jednotlivých diod a skutečné provedení desek na vnitřní straně dveří tedy vypadá následovně.





**Obr. 123** Zapojení LED diod na panelu kontrolek

Aby bylo možné zobrazovat informaci i na display operátora, vede informační signál zároveň na jeden z logických vstupů karty PXI 6528. Přirazení je v následující tabulce.

Informační signál			
označení	význam při stavu 24V	port/bit	panel LED
K0-0	Ventily průchodné	P0/0	1
K0-1	Agregát v chodu	P0/1	2
K0-2	Totál stop	P0/2	3
K0-3	Vývěva zapnuta	P0/3	4
K0-4	Vývěva bez poruchy	P0/4	5
K0-5	Mazání zapnuto	P0/5	6
K0-6	Systém OK (watchdog)	P0/6	7
K0-7	Koncové spínače v mezích	P0/7	10
K1-0	Chod	P1/0	9
K1-1	Režim start	P1/1	8
K1-2	Nízký tlak horizontální zapnut	P1/2	13
K1-3	Vysoký tlak horizontální zapnut	P1/3	15
K1-4	Nízký tlak vertikální zapnut	P1/4	14
K1-5	Vysoký tlak vertikální zapnut	P1/5	16
K1-6	Odpojovací ventily horizont. sepnuty	P1/6	11
K1-7	Odpojovací ventily vertikální sepnuty	P1/7	12
K2-0	Zkrat. ventil horizont. napáječe zapnut	P2/0	X
K2-1	Zkrat. ventil vertikál. napáječe zapnut	P2/1	X
K2-2	Akcelerometry OK	P2/2	X
K2-3	Akcelerometry vyřazeny	P2/3	X
K2-4	Bezpečnostní pás zapnut	P2/4	X
K2-5	Zpožděné vypnutí neaktivní	P2/5	X
K2-6	Síťové napájení OK	P2/6	X
	X	P2/7	X

V prvním sloupci je symbolické označení informačního signálu v celkovém schématu zapojení bezpečnostního systému. Z míst takto ve schématu označených tedy vede informační signál na odpovídající vstup karty a LED diodu na panelu kontrolek. Některé signály slouží jen pro vnitřní kontrolu softwarem a vedou proto jen na logický vstup karty bez signalizace LED diodou. Vstupy karty jsou opticky odděleny a ochráněny proti špičkám přímo na kartě, takže signály tam vedou přímo bez jakékoliv další úpravy.

#### 4.3.5. Pomocné spínače

Posledními z komponentů bezpečnostního systému jsou pomocné spínače. Jedna sada hlídá otevření mechanických vstupních hydraulických ventilů. Zde je dosud použito původní řešení klasickými mikrospínači. Vzhledem k naprosto vyhovující funkčnosti zatím nebyl důvod toto uspořádání měnit, i když po stránce estetické není zrovna elegantní.



**Obr. 124 Mikrospínač u mechanického přívodního ventilu**

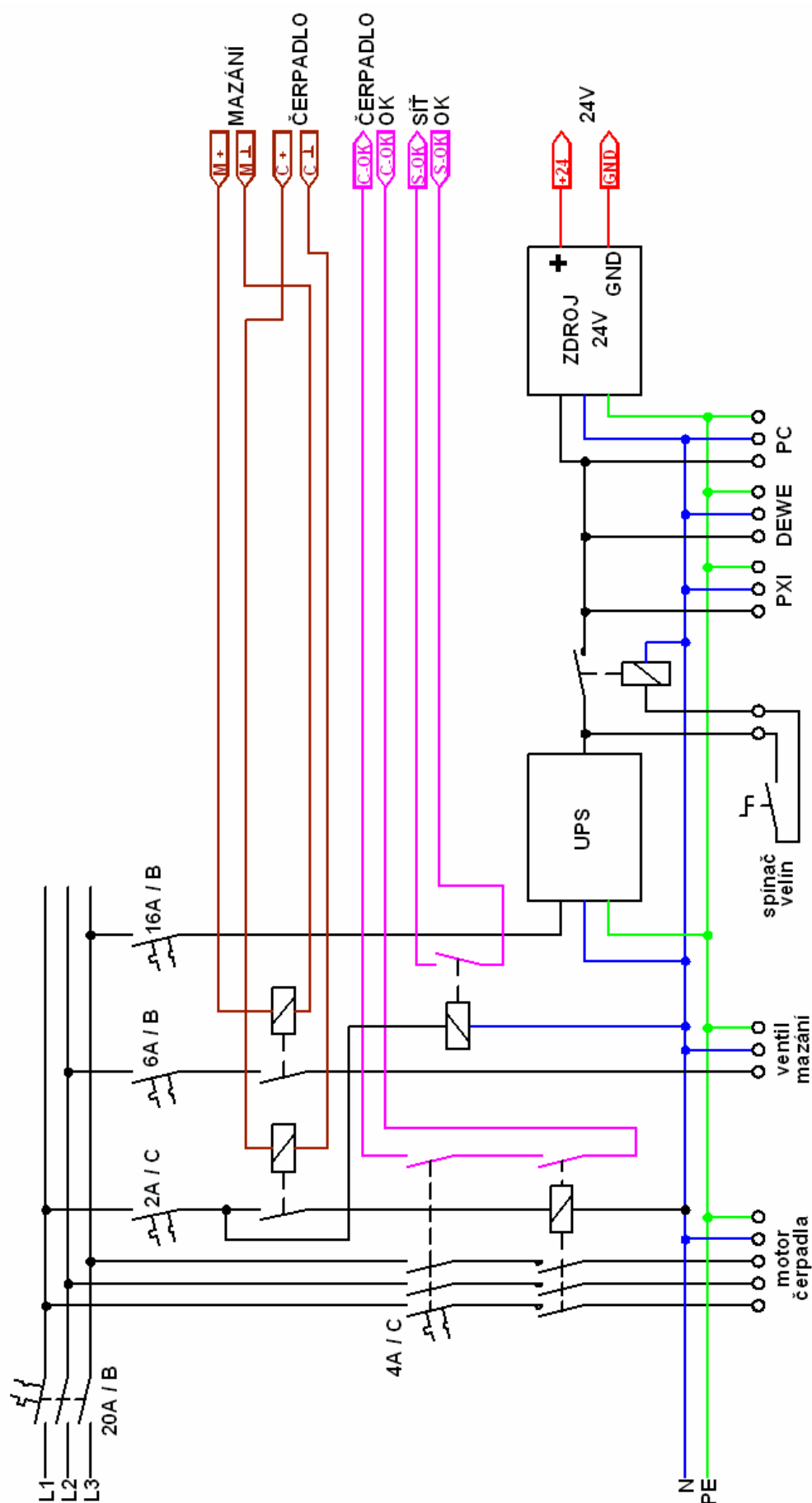
Jako další spínače jsou použity pomocné kontakty stykače motoru čerpadla odsávání a jeho proudové ochrany. Z těchto kontaktů se získává informace o činnosti odsávání. Poslední informací je přítomnost síťového napájecího napětí, která je vedena z kontaktů relé z cívkou na síťové napětí.

### 4.4. CELKOVÉ ZAPOJENÍ BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU

V této kapitole uvedu celkové schéma zapojení bezpečnostního obvodu. Schéma navazuje na zapojení výkonových obvodů v kapitole 3.1.4, protože jak už bylo v této kapitole konstatováno, bezpečnostní systém tvoří se spínači výkonových prvků jeden logický celek. Vzhledem k velkému rozsahu celkové zapojení rozčlením do třech logických celků. V prvním prakticky zopakují zapojení výkonové části, aby byly patrné návaznosti. Druhý celek tvoří vlastní logika bezpečnostního systému a třetí obsahuje zapojení spínačů jednotlivých ventilů.

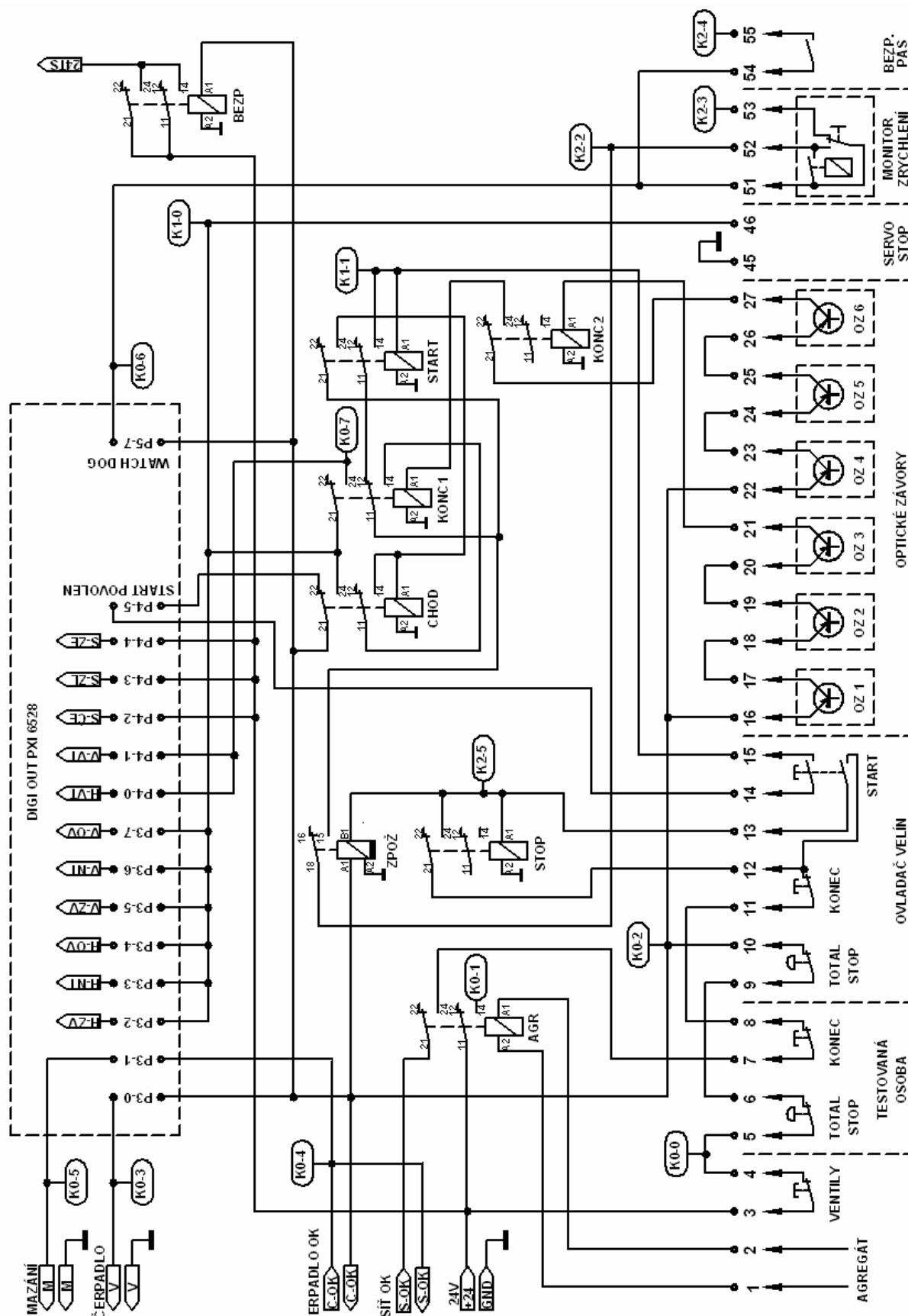
#### 4.4.1. Bezpečnostní systém – výkonová část

Do výkonových obvodů zasahuje bezpečnostní systém následovně. Za prvé odtud čerpá veškerou energii pro svojí činnost v podobě stejnosměrného napájení 24V (pro zvýraznění je ve schématu použita barva červená). Za druhé poskytuje logické signály pro sepnutí stykače motoru odsávání a ventilu mazání (hnědá). Za třetí pak zpětně získává informace o činnosti motoru odsávání a přítomnosti síťového napájecího napětí (fialová). Schéma zapojení této části je na následujícím obrázku 125.



Obr. 125 Bezpečnostní systém – výkonová část

#### 4.4.2. Bezpečnostní systém - logika



Obr. 126 Bezpečnostní systém – logika



Tato část tvoří jádro zapojení bezpečnostního systému. Napětí 24V ze zdroje vede na svorku č.3 a pak následuje sériové zařazení kontaktů otevřených mechanických ventilů a tlačítek TOTAL STOP. Pokud jsou všechny tyto kontakty sepnuty (nazvěme tento stav pro další popis „totalOK“), pokračuje signál na vstup A1 relé ZPOŽ se zpožděným odpadem. Tím je toto relé připraveno k sepnutí, ale skutečné sepnutí je řízeno až vstupem B1. Signál zároveň vede na spínač P3-0 karty PXI, čímž umožňuje softwaru sepnout motor čerpadla. Dále sepne i bezpečnostní relé, přes které vede přívod napájení 24V do všech elektromagnetických ventilů na plošině. Při stlačení některého z tlačítek TOTAL STOP nebo uzavření mechanického ventilu tedy okamžitě rozepne relé ZPOŽ, čímž se vypne napájení pro veškeré spínače na kartě PXI6528. To způsobí rozepnutí všech navazujících výkonových relé jednotlivých elektromagnetických ventilů na plošině. Zároveň se zastaví motor čerpadla a rozepne i bezpečnostní relé. Tím se vypne výkonový přívod napájení do elektromagnetických ventilů plošiny. Vypnutí těchto ventilů (ventily v napajecích a odpojovací ventily na motorech) je tak vlastně jistěno dvakrát. Jednou přes vlastní spínací relé a podruhé odpojením napájení bezpečnostním relé.

Je-li stav „totalOK“ může software zapnout motor čerpadla. Pokud stykač přitáhne a proudová ochrana motoru je v pořádku, vrátí se kontrolní signál. Ten vede na spínač P3-1 karty, čímž je umožněno sepnutí ventilu mazání kloubů. Signál zároveň vede přes kontakt relé přítomnosti síťového napájení a kontakt relé běhu agregátu na sériově řazené kontakty předčasného ukončení zkoušky. Pokud je toto vše v pořádku, dostane se signál na kontakt 21 relé STOP a zároveň na jeden z kontaktů tlačítka pro hardwarové potvrzení startu. Pokud dá operátor stisknutím tohoto tlačítka povel ke startu, sepne relé STOP a to se přidrží sepnuté právě signálem z kontaktu 21. Tím se signál dostane i na vstup B1 relé ZPOŽ a to přitáhne. Dojde-li během činnosti plošiny k výpadku čerpadla, výpadku sítě, výpadku agregátu nebo stlačení tlačítek předčasného ukončení zkoušky, ztratí se přidržovací signál relé STOP a to okamžitě odpadne. Tento stav je přes kontrolní bod K2-5 přečten softwarem a ten zahájí utlumení pohybu (viz kapitola 3.2.5). Žádná z těchto „poruch“ není tak kritická, aby se musela plošina zastavit okamžitě. Při výpadku sítě vše napájí UPS, ztráta tlaku při výpadku agregátu také není skoková (setrvačnost motoru a energie shromážděná v akumulátorech udrží plošinu v chodu), bez odsávání průsaků to chvíli také vydrží a tlačítka předčasného ukončení zkoušky jsou tam právě pro tuto možnost plynulého zastavení. Vypnutím relé STOP se ztratí signál ze vstupu B1 a tím se začne odpočítávat čas zpožděného odpadu. Ten je nastaven na 3 sekundy, během kterých software zastaví pohyb. Pak relé odpadne, tím se vypne napájení do spínačů karty PXI, což je již analogické z dříve popsáním stavem při stlačení TOTAL STOP – vše se vypne a plošina sjede do dolní polohy.

Je-li stav „totalOK“, vede signál zároveň i na spínač P5-7 karty PXI6528, což je kontakt obvodu watchdog a dále na kontakt relé monitoru zrychlení. Pokud jsou tyto obvody v pořádku, dostane se signál na kontakt 18 relé ZPOŽ. Toto relé je tedy pro činnost plošiny stěžejní. Pokud signál prochází přes jeho kontakt 18 – 15 dále, umožňuje činnost plošiny. Přerušení tohoto signálu buď ztrátou napětí na kontaktu 18 (monitor zrychlení a watchdog) nebo vypnutím relé (okamžitým přes vstup A1 při Total stopu nebo zpožděným přes vstup B1) dojde ke ztrátě napájení pro spínače na kartě PXI6528 a tím rozepnou všechny následné výkonové spínače elektromagnetických ventilů nezávisle na stavu spínačů karty PXI6528.

Samostatnou kapitolu tvoří optické snímače překročení maximálního zdvihu. Plošina je totiž v klidovém stavu sjetá v dolní poloze, čímž jsou všechny svislé optické závory mimo rozsah – tedy „v poruše“. Kdyby jejich výstup byl pouze zařazen sériově k dalším monitorům (watchdog a zrychlení), plošina by nikdy nemohla nastartovat právě pro rozpojené ochrany překročení zdvihu. Z tohoto důvodu jsem musel vytvořit zvláštní režim „START“, kdy jsou tyto ochrany překlenuty (vyřazeny) a tím je umožněn start zařízení. O tuto funkci se stará čtveřice relé CHOD, START a KONC1, KONC2. Relé KONC jsou dvě jen z důvodu úbytku napětí na tranzistorech optických závor (viz.kapitola 4.3.2), jsou zařazené v podstatě sériově a

proto se pro další popis činnosti stačí zabýrat je relé KONC1. V klidovém stavu jsou tedy všechna tato relé rozepnuta. Signál „totalOK“ napájí vždy první z trojice optických závor a zároveň prochází přes rozepnutý kontakt 21-22 relé CHOD na spínač P4-5 karty PXI6528, odkud vede na druhý kontakt tlačítka pro hardwarové povolení startu. Pokud tedy startovací sekvence softwaru povolí start zařízení, sepne spínač P4-5, čímž se napětí dostane na hardwarové tlačítko a operátor je na monitoru vyzván k jeho stlačení. Pokud tak učiní, sepne za prvé relé ZPOŽ a za druhé i relé START. Pokud jsou ostatní bezpečnostní obvody v pořádku, přidrží se relé START zapnuté napětím procházejícím přes sepnutý kontakt relé BEZP, rozepnutý kontakt 11-12 relé KONC1 a svůj vlastní kontakt 11-14. Zároveň kontaktem 21-24 sepne relé CHOD. To přepnutím kontaktu z 21-22 na 21-24 odpojí napájení do tlačítka hardwarového startu a dodá napájení do spínačů P3-2 až P3-7. Tím může software zapnout odpojovací ventily na motorech, zkratovací ventily a ventily nízkého tlaku v napáječích. Plošina tak může omezenou rychlostí danou napájením pouze nízkým tlakem hydrauliky najet do střední polohy. Během tohoto najíždění se dostanou optické závory do rozsahu, čímž přitáhne relé KONC1. Přepnutím jeho kontaktu z 11-12 na 11-14 se ztratí přidržovací napětí pro relé START a to odpadne. Zároveň se dostane přidržovací napětí přes kontakt 11-14 relé CHOD na jeho cívkou a to tak zůstane sepnuté. Přes sepnutý kontakt 21-24 relé KONC1 se dostane napájení na spínače P4-0 a P4-1 karty PXI6528 a to umožní softwaru zapnout po najetí do střední polohy zapnout plný tlak. To je plně provozní stav. Od okamžiku sepnutí relé KONC1 je hlídání polohy okamžitě plně funkční, režim start se tedy vypíná automaticky v okamžiku najetí všech poloh do rozsahu. Jakmile dojde kdykoliv od tohoto okamžiku k rozpojení některé z polohových ochran, odpadne relé KONC1, tím se ztratí přidržovací napětí pro relé CHOD a odpadne i to. Výsledkem je opět ztráta napájení pro spínače na kartě PXI6528 a tím vypnutí všech ventilů. Aby vypnutí polohou nemohlo být narušeno trvalým stlačením tlačítka hardwarového startu – tím by v okamžiku vypnutí relé CHOD ihned opět nastal režim START a ventily by opět sepnuly, software okamžitě po stlačení tlačítka startu (detekuje ho kontrolním bodem K2-5) rozpojí spínač P4-5. Tím je tlačítko hardwarového startu nefunkční až do doby, kdy dojde k nové softwarové startovací sekvenci. V té době jsou však spínače ventilů na kartě PXI6528 ve výchozím, tedy rozpojeném, stavu.

Na schématu je ještě vidět kontrola zapnutí bezpečnostního pásu na sedačce testované osoby, což je řešeno standardním kontaktem v bezpečnostním pásu, jehož sepnutí je detekováno jen softwarově kontrolním bodem K2-4. Vývod SERVO STOP není použit, je to pozůstatek z doby, kdy se uvažovalo o vypínání servoventilů na místo použití odpojovacích ventilů.

Poznámka:

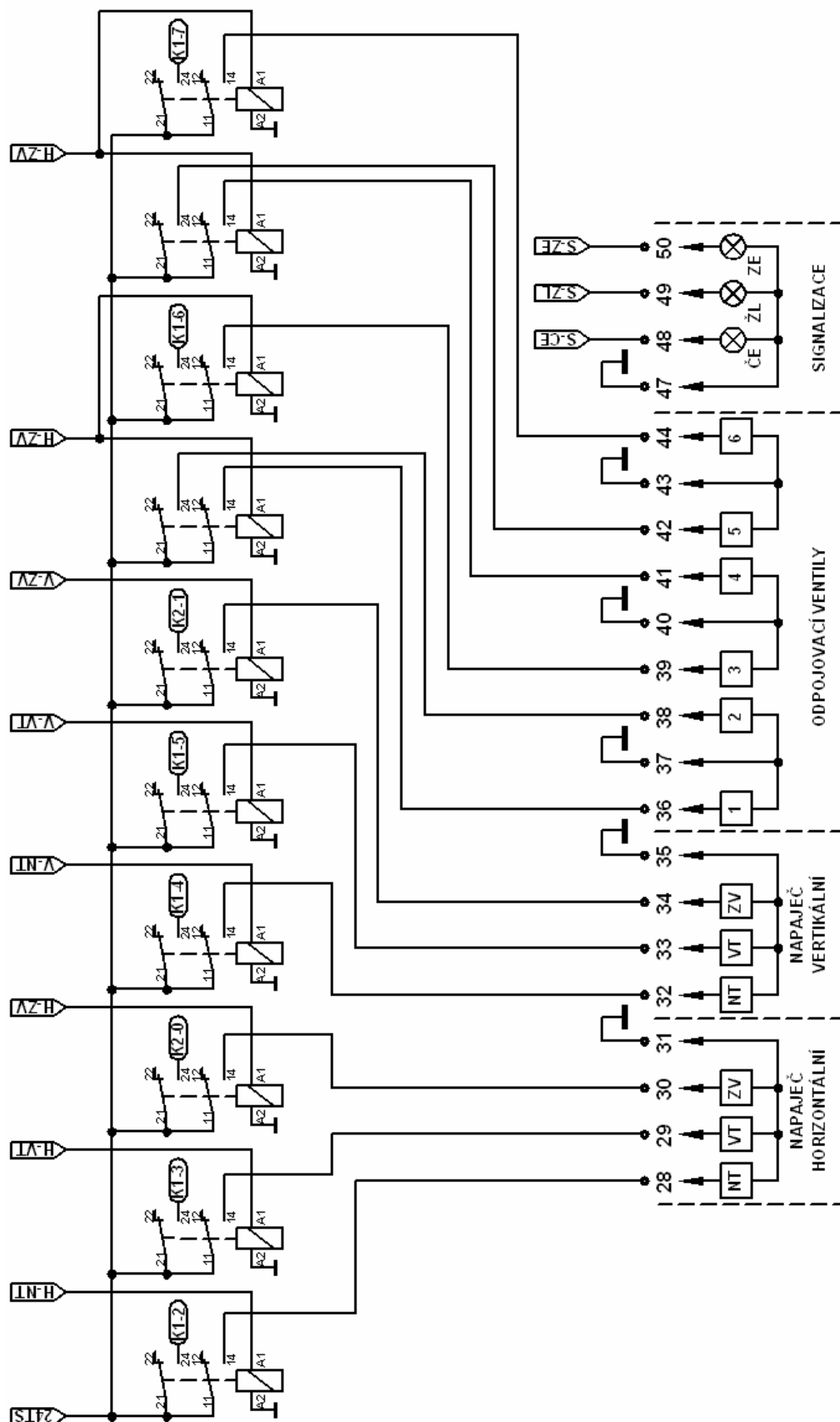
Karta PXI6528 obsahuje celkem šest osmibitových portů. Tři vstupní porty s čísly 0 až 2 jsou osazeny oddělovacím optronem s ochranou vstupu. Na ně vedou přímo kontrolní signály z míst ve schématu označených Kx-y. Tedy například K0-3 znamená, že z tohoto místa vede signál na třetí bit portu 0. Ve schématu tento vodič není nakreslen, protože kontrolních bodů je mnoho a schéma by se stalo nepřehledné. Výstupní porty z čísel 3 až 5 jsou osazeny miniaturními relé. Označení ve schématu např. P3-0 tedy znamená, že v tomto místě je zapojen spínací kontakt relé na bitu 0 portu číslo 3.

Číslo na výstupní svorkovnici odpovídá skutečnému číslu svorky v rozvaděči.

#### **4.4.3. Bezpečnostní systém – spínače ventilů**

Tato část je již velmi jednoduchá. Obsahuje jen sadu relé, které jsou spínány signály z výstupních portů karty PXI6528. Jejich spínací kontakty přivádí napájení z bezpečnostního relé již přímo na jednotlivé elektromagnetické ventily na plošině. Relé pro odpojovací ventily jsou zdvojeny, aby jeden kontakt spínal vždy jen jednu cívku ventilu. Sepnutí kontaktů relé je opět vedeno přes kontrolní body do vstupů karty PXI6528. Pomocí výstupů z karty se

ovládají i signální světla u plošiny. Ty mají malý příkon a proto mohou být ovládána přímo z karty bez dalšího relé.



Obr. 127 Bezpečnostní systém – spínače ventilů

#### 4.5. OVĚŘENÍ ČINNOSTI BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU

Pro ověření celkové činnosti bezpečnostního systému byla provedena řada zkoušek, které odpovídaly reálnému použití plošiny. Na desku byla ukotvena sedačka a na ní umístěna zátěž 80 kg.



**Obr. 128 Plošina se sedačkou pro testování bezpečnostního systému**

V první fázi se testovaly jednotlivé prvky bezpečnostního systému. Pro tento účel byla vytvořena sada budících signálů, založených na harmonických průbězích, do kterých byla vždy vsunut poruchový děj pro jednu veličinu – tedy například překročení maximální polohy nebo zrychlení na jednom motoru. Výsledkem musela být reakce bezpečnostního systému. Sada těchto zkoušek byla zdlouhavá a nezajímavá - najetí do výchozí polohy, spuštění signálu, reakce bezpečnostního systému, zastavení pohybu a znovu totéž pro další signál. Výsledky jsou shrnuty v následující tabulce, ze které plyne stoprocentní funkčnost.

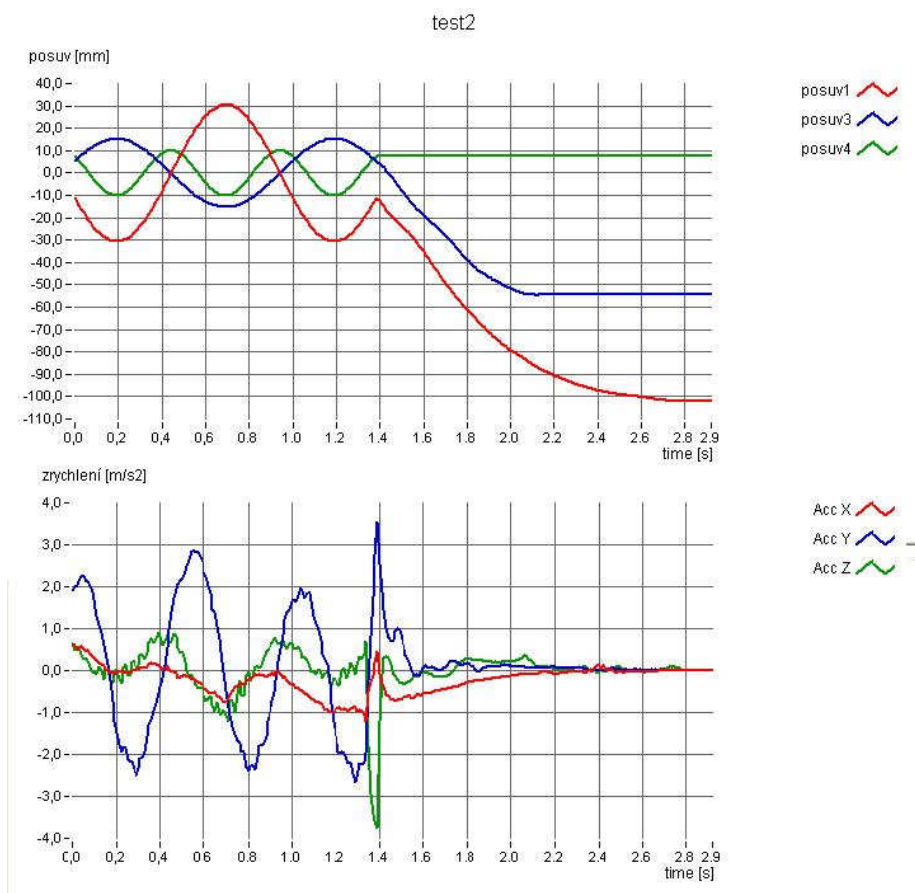
	posuv +	posuv -	zrych +	zrych -
motor 1	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.
motor 2	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.
motor 3	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.
motor 4	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.
motor 5	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.
motor 6	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.

V další fázi se obdobně testovaly tlačítka, výpadky sítě a řídicího systému, také zde byla stoprocentní funkčnost.

Poslední zkoušky se zaměřily na proces vlastního zastavení pohybu. Plošina vykonávala obecný prostorový pohyb, složený z různých harmonických signálů jednotlivých motorů, který byl volen tak, aby odpovídal normě pro použití z člověkem. V náhodném okamžiku byla vyvolána akce bezpečnostního systému, například stlačením Total stop a byla sledována plynulost zastavení pohybu pomocí měření zrychlení a polohy tří zvolených motorů (dvou svislých a jednoho vodorovného). Zrychlení bylo měřeno tříosým akcelerometrem na plošině (na obrázku 128 je to ta oranžová krabička pod sedačkou). K záznamu signálu opět posloužila ústředna DEWE 5000. Příklad výsledků je posledním grafu v této práci, obrázku 129. Z průběhů zrychlení je vidět, že během zastavování pohybu se amplituda zrychlení příliš



nelišila od průběhu během testu, takže zastavení proběhlo maximálně šetrně. Dopad do tlumicí podložky již nebyl vůbec zaznamenán.



Obr. 129 Příklad průběhů při nouzovém zastavení pohybu

Z testů provedených testů jasně vyplynulo, že bezpečnostní systém plošiny splňuje kritéria požadovaná normou a všechny jeho obvody plní svou funkci. Navržená koncepce i praktická realizace je tedy správná.

## 5. ZÁVĚR

V předložené práci je popsán můj příspěvek ke zrodu unikátního testovacího zařízení – plošiny se šesti stupni volnosti. Ta vznikla v Hydrodynamické laboratoři Katedry částí a mechanismů strojů a na její stavbě se podíleli odborníci jak z této, tak z katedry Mechaniky pružnosti a pevnosti. Práce trvaly několik let a byly podpořeny výzkumným záměrem MSM 4674788501 Optimalizace vlastností strojů v interakci s pracovními procesy a člověkem. Zařízení je v současné době již dokončeno a předáno do normálního provozu v laboratoři. O důležitosti stavby tohoto zařízení svědčí fakt, že prakticky ihned po uvedení do provozu se začalo používat v rámci grantu řešícího problematiku snížení vibrační zátěže obsluhy důlního stroje v povrchových dolech a v pomyslné frontě na jeho používání čekají další dva týmy, zabývající se vývojem aktivně odpružené sedačky a výzkumem komfortu sezení v osobních vozech. Všechny tyto aktivity vznikly z popudu průmyslu a provádí se v těsné spolupráci s významnými firmami působícími v uvedených oborech. Další probíhající výzkum se zaměřuje na vliv vibrací na svalové reakce člověka a probíhá v přímé spolupráci s lékaři.

Ve své práci jsem se převážně zaměřil na problematiku, kterou jsem řešil já – tedy řídicí a bezpečnostní systém, ale vzhledem k provázanosti celého projektu jsem se občas zmínil i o navazujících systémech. V práci je popsán komplexní návrh, postup ladění i praktická realizace jak hardwarových tak softwarových prostředků řízení, který jsem provedl tak, aby byla zajištěna potřebná dynamika systému při dodržení požadované přesnosti regulace a celý systém navíc odpovídal všem požadavkům normy ČSN EN ISO 13090-1 „Vibrace a rázy – Pokyny pro bezpečnostní hlediska zkoušek a pokusů na lidech“. Práce rovněž uvádí příklady praktických měření, kterými se v realu ověřovala činnost zařízení.

Stěžejní část mojí práce vidím v návrhu a konstrukci bezpečnostního systému a ve vytvoření speciálního jednoúčelového softwarového balíku v operačním systému reálného času, který řeší veškeré potřeby uvedeného zařízení z ohledem na požadavky normy pro testy s člověkem. Tím se toto zařízení liší od jiných systémů v laboratoři, která původně neměla pro takovéto zkoušky sloužit a proto jsou jejich bezpečnostní standardy na nižší úrovni. Tuto skutečnost, tedy existenci propracovaného bezpečnostního systému přímo svázaného s ostatními prostředky plošiny a ovládání zařízení speciálním softwarem, který automatizuje standardní úkony při ovládání plošiny a je koncepčně sestaven tak, aby prakticky vyloučil chyby operátora, ocenila i technická komise při schvalování zařízení do provozu. Komise byla složena ze čtyřech odborníků z různých institucí zabývajících se podobnou problematikou a po seznámení s principy řízení a zabezpečení plošiny ji jednomyslně uvolnila pro testy mechanických celků z člověkem. Tím bylo vlastně nezávislými odborníky potvrzeno, že práce celého realizačního týmu byla úspěšně dovedena do cíle. Bylo tedy potvrzeno, že i můj řídicí a bezpečnostní systém, jehož zrod, ožívování, ladění a testování jsem popsal v této práci, je spolehlivě funkční i pro tak náročné aplikace, jako jsou testy mechanických celků s živými lidmi.

## 6. PROTOKOL O SCHVÁLENÍ ZAŘÍZENÍ DO PROVOZU

T E C H N I C K Á   U N I V E R Z I T A   V   L I B E R C I

FAKULTA STROJNÍ

### **Protokol z jednání komise pro technickou bezpečnost „Posouzení technické bezpečnosti vibračního experimentálního zařízení s šesti stupni volnosti z hlediska zkoušek s pokusnými osobami“**

Komise pro technickou bezpečnost jmenovaná děkanem Fakulty strojní technické univerzity v Liberci ve složení:

Ing. Jaroslav Bříza, CSc.

Ing. Martin Bušek, Ph.D.

Ing. Ivan Kraus

doc. Ing. Pavel Souček, DrSc.

GTM s.r.o. Praha

VÚTS a.s. Liberec

SEALL v.s.o. Chomutov

FS ČVUT Praha

se sešla dne 2. 12. 2008, aby ve smyslu normy ČSN EN ISO 13060-1 *Vibrace a rázy – pokyny pro bezpečnostní hlediska zkoušek a pokusů na lidech Část 1: Expozice celkovým vibracím a opakovaným rázům*, posoudila technickou způsobilost a bezpečnost experimentálního vibračního zařízení s šesti stupni volnosti z hlediska zkoušek s pokusnými osobami, při kterých se zamýšlí sledování přenosu vibrací v soustavě sedadlo vozidla (resp. pracovního či důlního stroje) – řidič (resp. operátor, uživatel).

Autoři experimentálního zařízení doc. Ing. Jaromír Barbora, CSc., Ing. Aleš Lufinka a provozovatelé doc. Ing. Josef Mevald, CSc., Ing. Jiří Blekta, Ph.D. seznámili komisi s konstrukcí, funkcí a bezpečnostními prvky experimentálního vibračního zařízení instalovaného v hydrodynamické laboratoři katedry částí a mechanismů strojů na Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci.


Po prohlídce experimentálního vibračního zařízení a ověření funkcí bezpečnostních prvků při všech normou doporučených simulovaných poruchových stavech technická komise konstatuje, že jsou splněny všechny podmínky Přílohy E – *Konstrukce zařízení* normy ČSN EN ISO 13060-1 *Vibrace a rázy – pokyny pro bezpečnostní hlediska zkoušek a pokusů na lidech Část 1: Expozice celkovým vibracím a opakovaným rázům* a v souladu s touto normou uděluje povolení k provozu tohoto zařízení pro zkoušky s pokusnými osobami zahrnující expozici vibrací a rázů.

Komise doporučuje:

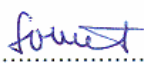
- vedení provozní knihy a pravidelné testování hardwarových prvků bezpečnostního a řídicího systému dle bodu E6 přílohy,
- jednorozměrnou kontrolu čistoty oleje hydraulické kapaliny dle ISO 4406.

V Liberci 2. 12. 2008.

  
.....  
Ing. Jaroslav Bříza, CSc.

  
.....  
Ing. Ivan Kraus

  
.....  
Ing. Martin Bušek, Ph.D.

  
.....  
doc. Ing. Pavel Souček, DrSc.

## **7. LITERATURA**

### **7.1. POUŽITÁ LITERATURA**

- [1] ČSN EN ISO 13090-1 Vibrace a rázy – Pokyny pro bezpečnostní hlediska zkoušek a pokusů na lidech. Český normalizační institut, Praha, 1999.
- [2] Návod pro montáž, obsluhu a údržbu hydromotoru SAVAD. Inova Praha s.r.o, 1981
- [3] Servo directional valve of 4-way design Type 4WS.2EM. Manuál na [www  
http://www.boschrexroth.com/various/tools/lucsearch.jsp?query=4WS.2EM&oid=262](http://www.boschrexroth.com/various/tools/lucsearch.jsp?query=4WS.2EM&oid=262)
- [4] Návod pro montáž, obsluhu a údržbu napáječe NOV 200 M10. SEAL v.o.s Chomutov, 1981
- [5] ČSN EN ISO 2631-1 Vibrace a rázy – Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím. Český normalizační institut, Praha, 1999.
- [6] PXI 8176 user manual. Dokumentace na [www.  
http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/  
8D62E7917025CCC886256ABE004D3D0C](http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/8D62E7917025CCC886256ABE004D3D0C)
- [7] NI 6040E Family Specifications. Dokumentace na [www.  
http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/  
939508BA6D420074862570A80065DFC6](http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/939508BA6D420074862570A80065DFC6)
- [8] NI 6711/6713/DAQCard-6715 Specifications. Dokumentace na [www.  
http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/  
D3E34F907AAD14B18625730600785D3A](http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/D3E34F907AAD14B18625730600785D3A)
- [9] NI 6528/6529 User Guide and Specifications. Dokumentace na [www.  
http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/577E7DD4B54FBD8786257364005B2575](http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/577E7DD4B54FBD8786257364005B2575)
- [10] Universal LVDT Signal Conditioner AD 698. Dokumentace na [www.  
http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/A698.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/A698.pdf)
- [11] DEWE 30-16 technical reference manual. Dokumentace na [www.  
http://www.dewetron.com/fileadmin/dam/manuals/dewetron/english/DEWE-30-  
16\\_102e.pdf](http://www.dewetron.com/fileadmin/dam/manuals/dewetron/english/DEWE-30-16_102e.pdf)
- [12] DAQP/TRQ technical reference manual. Dokumentace na [www.  
http://www.dewetron.com/fileadmin/dam/manuals/dewetron/english/DEWE-  
Modules\\_techref\\_221e.pdf](http://www.dewetron.com/fileadmin/dam/manuals/dewetron/english/DEWE-Modules_techref_221e.pdf)

- [13] Ing. M. Andreáš, Ing. M. Ručka: Převodník napětí-proud. Amatérské radio, ročník XXX/1981, číslo 3, řada B, str.99.
- [14] MTM power PCMA 30D15 technical specifications. Dokumentace na [www](http://www.mtm-power.com/datenbankEng/datei/pma-pcma30.pdf).  
<http://www.mtm-power.com/datenbankEng/datei/pma-pcma30.pdf>
- [15] COSEL PBA 300F technical specifications. Dokumentace na [www](http://www.qscomp.cz/Pdf/pba0300f.pdf).  
<http://www.qscomp.cz/Pdf/pba0300f.pdf>
- [16] LabVIEW 8.2. Help. Dokumentace na [www](http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/88FCF2840C4C7A1F862571D2006E0A94).  
<http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/88FCF2840C4C7A1F862571D2006E0A94>
- [17] LabVIEW Real-Time Module 8.2 Help  
<http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/675B3BB0C66734C3862571C700718D20>
- [18] LabVIEW PID Control Toolkit User Manual  
<http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/23880AD630A3C0E386257181007356B0>
- [19] Ing. P. Souček: Elektrohydraulické servomechanismy. ČVUT Praha, 1992
- [20] Ing. L. Spíral, Ing. V. Ovsjannikov: Optimalizace průmyslových regulačních obvodů. SNTL Praha, 1982.
- [21] P. Noskievič: Modelování a identifikace systémů. Montanex Ostrava, 1999
- [22] 4/2- and 4/3-way isolating valves Type Z4WE 6  
<http://www.boschrexroth.com/Rexroth-IHD/Home.cfm?Page=RDSearch&Filter=23193>
- [23] Optická závora BGL 120A. Dokumentace na [www](http://www.balluff.cz/Download/katalogy/haupt/S22_0703_cz.pdf#page=85).  
[http://www.balluff.cz/Download/katalogy/haupt/S22\\_0703\\_cz.pdf#page=85](http://www.balluff.cz/Download/katalogy/haupt/S22_0703_cz.pdf#page=85)
- [24] Akcelerometr ADXL 204. Dokumentace na [www](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL204.pdf).  
[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADXL204.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL204.pdf)
- [25] LM339 Quad differential comparators. Dokumentace na [www](http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/84696/TI/LM339.html).  
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/84696/TI/LM339.html>
- [26] LM136 Reference diode. Dokumentace na [www](http://cache.national.com/ds/LM/LM136A-5.0.pdf).  
<http://cache.national.com/ds/LM/LM136A-5.0.pdf>



## 7.2. VLASTNÍ PUBLIKACE

Lufinka,A.: Návrh bezpečnostního systému plošiny se šesti stupni volnosti,  
46. mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů, Liberec, 2005

Lufinka,A.: Bezpečnostní systému plošiny se šesti stupni volnosti,  
47. mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů

Lufinka,A.: Řízení plošiny se šesti stupni volnosti s ohledem na bezpečnost zkoušeného objektu, 48. mezinárodní konference kateder částí strojov a mechanismov

Lufinka,A.: The six degrees of freedom platform, 45. mezinárodní konference Experimentální analýza napětí

Lufinka,A.: Optimalizace dynamických vlastností plošiny se šesti stupni volnosti, 49. mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů

Blekta,J., Lufinka,A., Dvořák.B, Šír,M.: Some problems of car seat measurement on board with six degrees freedom. 46. mezinárodní konference Experimentální analýza napětí